

財団法人 次世代金属·複合材料研究開発協会

平成13年3月

新エネルギー・産業技術総合開発機構委託

平成12年度

新規產業創出型產業科学技術研究開発

「知的材料・構造システムの研究開発」 (エネルギー使用合理化技術開発)

成果報告書

「知的材料・構造システムの研究開発」

(エネルギー使用合理化技術開発)

財団法人 次世代金属・複合材料研究開発協会平成13年3月(表紙共 356 頁)

研究目的

本研究開発は、21世紀の中核を担う新素材として本格的適用が 期待されている先進複合材料の構造物(骨格)に、繊維あるいは箔状 にしたセンサ材料・素子(神経)やアクチュエータ材料・素子(筋肉)を 一体融合化し、情報処理・制御(脳)を行う、生命体と同じような知 覚、判断、応答といった機能、つまり知的機能を付与した構造シス テムの実用化に向けた基盤技術を開発しようとするものである。こ れにより、新製造技術関連分野はもとより、航空・宇宙関連分野等 広範囲な分野での新規産業の創出に資する。 この報告書は、大学連携型産業科学技術研究開発制度に基づき、新エネルギー・産業 技術総合開発機構(NEDO)より(財)次世代金属・複合材料研究開発(RIMCOF)が受託し た「知的材料・構造システムの研究開発」について、5ヵ年計画の3年度である平成12 年度の成果を取りまとめたものである。

RIMCOF は、昭和 56 年 8 月に設立されて以来、一貫して先進的金属と複合材料の 研究開発を推進してきた。現在は、平成 9 年度に開始した「スーパーメタル」(開発期 間 5 年)、平成 10 年度に開始した本プロジェクト、「超低損失柱上トランス」(開発期 間 4 年)および「輸送用先進複合材料」(開発期間 5 年)の計 4 件の多彩な大型プロジ ェクトを擁するマルチプロジェクト体制で進めている。

「知的材料・構造システム」プロジェクトの3年度は、4つの要素技術研究が適用技術も含め着実に進められ、次に述べるように世界的にも注目される種々の成果が着実に得られた。東京大学が主導する「ヘルスモニタリング技術」では、先に開発した細径光ファイバのCFRPプリプレグ中に埋め込み可能なFBGセンサ化の成功及びコネクタの開発等実用化の目途をつけると共に、同ファイバを用いた複合材料の衝撃負荷検出法や分布型BOTDR/FBG併用光ファイバセンサシステムの温度保障法等、構造要素レベルの適用技術への進展を見せた。また、光ファイバセンシング以外においてもAEセンサ、最大履歴歪記憶型パッチセンサ等について適用性検討のフェーズに入った。平成12年度終了テーマについては、反射型パッチセンサシステムの高速車両荷重支持構造体への適用化技術の開発、細径FBGセンサによる人工衛星構造体CFRP表皮の損傷検出、FBGセンサを用いた建築土木用ひずみ・変位・温度センサの高層建築物への適用実証等実構造体への適用性を検討し、当該技術の有効性を実証する等の成果を得たことは高く評価される。

大阪市立大学での「スマートマニュファクチャリング技術」においても、EFPI 光フ ァイバによる複合材料硬化過程のモニタリング等成形プロセスのセンシング技術、 RTM 成形おける3次元流動シミュレーション、プリフォームの深絞り成形等適用技術 への進展を見せた。

名占屋大学主導の「アクティブ・アダプティブ構造技術」では、小型構造要素供試体 にて目標である減衰係数の20%以上の向上、音響パワーの30%以上の低減を確認する と共に、形状記憶合金の減衰効果の評価及び数値解析を行い、提案した変形挙動解析モ デルの妥当性を検証した。平成12年度終了テーマについては、柔軟アンテナ模擬構造 物の形状・振動制御に対するアクティブ制御の有効性の実証、形状記憶合金ワイヤを埋 め込んだ高減衰複合材料システムの開発等の成果を得た。

東北大学での「アクチュエータ材料・素子の開発」では、圧電セラミックスアクチュ エータについては、マイクロ波焼結とホットプレスのハイブリッド焼結技術による圧電 特性の大幅な向上、シート化・線材化のプロセス技術の開発、くし型電極のシートアク チュエータの設計等適用技術への進展を見せた。形状記憶合金アクチュエータについて は、感温型では、Cu添加TiNi3元系合金の急冷凝固法による箔・帯状化を達成すると 共に、高温タイプの Ru-Nb 合金の 800~1200℃域の形状記憶特性の検討を行った。磁 気感応性形状記憶合金アクチュエータは、平成 12 年度終了テーマであるが、Ni2MnGa 合金のスパッタ膜による光学スキャナを作製し、磁場と熱により良好に作動することを 実証するとともに、同合金の素材開発からデバイス設計までの成果を総合的に検討、総 括した。本系形状記憶合金は、磁場を駆動力とすることにより、従来の TiNi 等感温型 合金での作動応答性を向上させる新たな形状記憶合金として今後の発展が期待される。

また、前述の4大学の研究への補完的研究として、東京都立科学技術大学、米国ワシントン大学に再委託を行っており、振動・騒音制御におけるスマート・クラスター制御法の提案、傾斜圧電アクチュータ、磁気感応性形状記憶合金(Fe-Pd-Pt3元合金)の開発等の着目すべき成果が出されている。さらに、工業技術院(平成 12 年度当時)の機械技術研究所、名古屋工業技術研究所および物質工学工業技術研究所においては産業基盤技術の立場から前述の要素技術研究を支援する重要な研究成果をあげている。

以上の要素研究の成果を踏まえて、平成11年度からは要素技術を統合してのデモン ストレータ試験が企業メンバーを中心にスタートし、基本計画(案)を策定、NEDO 推進 委員会の承認を経て、平成12年度より本格的な作業に入った。「損傷検知および損傷抑 制」並びに「騒音および振動低減」の両デモンストレータについて、試験内容、検証方 法、デモンストレータの諸元・構造、試験計測方法・装置、試験シーケンス、設計・製 造・試験日程等の検討を行い、デモンストレータの基本設計書を取りまとめた。平成 13年度にデモンストレータの詳細設計及び部分組立、14年度に最終組立及び検証試験 を実施する予定である。

また、研究開発成果の発表と討論、関係者の技術交流を目的に第2回シンポジウムを 開催し、200 名を越える参加者を見、盛況裡に終えることができたこと及び知的材料・ 構造に関する世界最大規模の国際シンポジウムである第8回 SPIE シンポジウム(於 米 国カリフォルニア州、Newport Beach)において当該プロジェクトの成果の論文発表(21 件)及びブース展示(来訪者 200 名以上の盛況)を行い、技術交流、情報調査に努めたこ とも付記しておきたい。

(財)次世代金属・複合材料研究開発協会 専務理事 溝上 芳史

巻 頭 言

プロジェクトリーダー 産業技術融合領域研究所 岸 輝雄

材料に知能を付与するという概念は、すべての構造材料を母材料とする構造システムに適合し得 るが、とくに複合材料では、構造に応じた強化繊維配向や多機能化等の材料設計を行い得る利点を もつ。複合材料を母材料とする知的複合材料(スマートコンポジット)システムは、次世代複合材 料の発展の方向であり、高信頼性と低コスト化を両立し得る大きな可能性を秘めている。

5年間の予定で進めている「知的材料・構造システムの研究開発」プロジェクトも3年間を終了 し、研究開発も佳境にさしかかっていると言えよう。4つのサブグループにより進められてきた要 素技術開発の中には、世界的にも誇ることができる技術が数多く含まれている。2001 年 3 月に開 催された、本分野の最も権威ある会議である SPIE 主催のスマート構造・材料国際会議においては、 20 件以上の成果発表を行うとともに、RIMCOF の取りまとめのもとに、プロジェクトの成果の展 示を行った。これまでの優れた成果を広く世界的に認知させるとともに、厳しい評価を受けること ができた。平成 12 年度においては、各要素技術の開発を着実に行いつつも、モデル構造、部分実 構造などへの実証を目指した適用化技術により主眼をおいて研究を進めた。各サブグループの活発 な研究成果は以下のようにまとめられる。

「ヘルスモニタリング技術の開発」においては、CFRP プリプレグ中に埋込み可能な、世界で初 めての細径ファイバブラッググレーティング(FBG)センサの実用化の目途をつけるとともに、最弱 層である 90 度層クラック検出法を確立した。この細径 FBG センサは、CFRP 補強平板構造の衝撃 負荷検出や人工衛星構造体 CFRP 表皮の熱サイクル損傷の検出にも適用されている。また、この 90 度層クラックの発生・進展を抑制するための形状記憶合金箔埋込み法の実証を擬似等方性 CFRP 積 層板について成功した。さらに、分布型 BOTDR/FBG 併用光ファイバセンサシステムの温度保証法 の確立、構造適用化の実証にも成果が得られた。この他にも、FBG センサを用いた建築土木用ひず み、変位、温度センサの高層建築物への適用、電気抵抗変化を利用した最大ひずみ記憶型センサの 開発、などの成果が得られている。

「スマートマニュファクチャリング技術の開発」においては、知的成形プロセスにおけるセンシング技術に関して、硬化過程に加えて樹脂流動のモニタリングが可能な誘電率センサの開発に世界に先駆けて成功している。また、EFPI光ファイバセンサを用いた硬化収縮ひずみの測定結果より、硬化状態が検出できることを明らかにしている。統合化プロセスの開発では、デモンストレータの開発に向けて、RTM プリフォームの深絞り技術の開発を着実に行っている。さらに、種々の母構造への一体化に関して、その場観察が可能な小型負荷試験機を製作し、モニタリング機能に影響を与えないセンサの埋め込みや取り出し手法の開発に成功している。

「アクティブ・アダプティブ構造技術の開発」においては、小型構造要素供試体の振動および音響制御試験を行い、目標である減衰係数の 20%以上の向上、音響パワーの 30%以上の低減を確認 できた。柔軟アンテナ模擬構造物では、形状・振動制御に対するアクティブ制御の有効性を実証し た。電気粘性流体を用いた振動制御では、電気粘性流体と圧電材料を組み合わせたハイブリッド構造要素供試体の製作、振動制御モデル作成、制御則設計を実現した。パッシブ制御に関しては減衰材料として用いる形状記憶合金ワイヤの減衰効果を評価試験、疲労試験および数値解析行い、その 減衰効果の定量化に成功した。

「アクチュエータ材料・素子の開発」においては、圧電材料関係では、マイクロ波焼結とホット プレス技術を利用したハイブリッド焼結により PZT 系材料の圧電特性の向上に成功するとともに、 PNN-PZT 系材料の焼結にもハイブリッド焼結を適用した。また、PZT および PNN-PZT 系において、 ゾルと粉末の混合体から押出しにより直径 250~300 µm、長さ数 m のファイバを成形することに 成功した。さらに高い耐久性をもつ、常温および高温駆動型 FGM アクチュエータの開発にも成果 を納めている。形状記憶合金関係では、Ti-Ni-Cu 系合金のアーク溶解とその後の液体急冷凝固法に よる箔、帯板試料の作成に成功し、形状記憶特性を評価した。また、高温型については、Ru-Nb 合 金や Ru-Ta 合金系の開発を進めた。さらに、100mm以下の Ti-Ni 細線素材を繰返し熱間・冷間圧 延法により、世界最薄レベルの 10 µm まで薄くする製造技術の実証に成功している。

各サブグループ間の調整等を円滑に進めるために、技術委員会及び幹事会を適宜開催するとと もに、毎月の実施内容ならびに翌月の実施計画、問題点等について、各研究開発グループからの 報告を取りまとめ、月次報告としてプロジェクトの全研究開発関係者に配布し、各研究テーマの 進捗状況をプロジェクト参画者全員が適時把握できるようにした。これにより、以下に示すデモ ンストレータの実現に向けた組織的な対応が可能となった。

今年度は、各研究開発成果を統合した実構造要素を試作し、各研究開発項目の目的達成度を検証 するとともに、知的構造システム技術の共通基盤技術を確立することを目的とした「デモンストレ ータ試験」の実現に向けて、本格的な基本設計作業を推進した。何種類ものケーススタディの結果、 直径 1.5m、長さ 3m の 2 体の航空機胴体構造モデルにより、「損傷検知・損傷抑制」および「騒 音・振動の低減」を実証することとした。デモンストーション・テーマの達成目標に対する達成度 検証方法、試験内容、供試パネルの諸元・構造、デモンストレータ全体の諸元・構造ならびに強度・ 剛性、試験装置、計測方法・装置、試験シーケンス、各社分担構造部位間のインターフェース、設 計・製造・試験日程、等の解析および技術検討を進めた。平成 13 年度には、より具体的な詳細設計 が予定されている。

個々の独自性のある優れた要素技術開発を行うことの重要性に加え、これらをインテグレート したシステムを実現することは困難を極めるが、世の中に我々の研究開発成果を認知していただ く上で不可欠な仕事と考え、精力的に取り込んでいく所存である。今後とも、関係各位の御協力 と益々の御援助を期待する次第である。 目 次

はしがき	1
巻頭言	3

概 要

1. 研	Ŧ究実施状況	9
1.1	研究期間	9
1.2	研究項目と実施状況	9
1.3	研究開発の実施場所	10
1.4	研究開発体制	11
1.5	研究担当者氏名	12
2.研	F究目標と成果	18

本 文

I. ヘルスモニタリング技術の開発	
1. 研究開発の成果と達成状況	2 3
1.1 研究開発の成果	23
1.2 達成状況	58
1.3 結論	58
2.研究発表・講演、文献、特許等の状況	60

Ⅱ. スマートマニュファクチャリング技術の開発

1. 研	究開発の成果と達成状況	65
1.1	研究開発の成果	65
1.2	達成状況	98
1.3	結論	99
2.研	究発表・講演、文献、特許等の状況	101

Ⅲ. アクティブ・アダプティブ構造技術の開発

1.研	究開発の成果と達成状況	105
1.1	研究開発の成果	105
1.2	達成状況	174
1.3	結論	175
2. 研	究発表・講演、文献、特許等の状況	176

Ⅳ. アクチュエータ材料・素子の開発	
1. 研究開発の成果と達成状況	183
1.1 研究開発の成果	183
1.2 達成状況	226
1.3 結論	227
2.研究発表・講演、文献、特許等の状況	228
V. デモンストレータ試験	
1. 研究開発の成果と達成状況	237
1.1 研究開発の成果	237
1.2 達成状況	294
1.3 結論	295
2. 研究発表・講演、文献、特許等の状況	295
VI. 総合調査研究	299
1. 目的	300
2. 成果報告	301
Ⅶ. 共通基盤技術の形成	341
国立研究所	
I. 機械技術研究所	345
Ⅱ.物質工学工業技術研究所	349

概要

1. 研究身	ミ施状況	9
1.1 研究	究期間	9
1.2 研究	究項目と実施状況	9
(1)	ヘルスモニタリング技術の開発	9
(2)	スマートマニュファクチャリング技術の開発	9
(3)	アクティブ・アダプティブ構造技術の開発	9
(4)	アクチュエータ材料・素子の開発	9
(5)	デモンストレータ試験	10
(6)	総合調査研究	10
1.3 研究	究開発の実施場所	10
1.4 研究	究開発体制	11
1.4.1	研究開発責任者(PL)	11
1.4.2	研究組織	11
1.5 研	究担当者氏名	12
1.5.1	研究開発	12
1.5.2	技術委員会	16
2. 研究目	目標と成果	18
(1)	ヘルスモニタリング技術の開発	18
(2)	スマートマニュファクチャリング技術の開発	18
(3)	アクティブ・アダプティブ構造技術の開発	19
(4)	アクチュエータ材料・素子の開発	19
(5)	デモンストレータ試験	20
(6)	総合調査研究	20

-

1. 研究実施状況

1.1 研究期間

平成12年4月 1日から 平成13年3月31日まで

1.2 研究項目と実施状況

(1) ヘルスモニタリング技術の開発

半透明アルミナ/エポキシ複合材円筒状構造の実用模擬疲労負荷下での損傷定量化を行うとともに、反射型パッチセンサシステムの高速車両荷重支持構造体への適用化技術の 開発を行った。

FBG 光ファイバセンサシステムについては、細径センサによる人工衛星構造体 CFRP 表 皮の熱サイクル損傷の検出技術の実証に成功した。また、FBG 光ファイバセンサを用いた 建築土木用ひずみ、変位、温度センサの高層建築物への適用を行い、その有効性を実証 した。

(2) スマートマニュファクチャリング技術の開発

知的成形プロセスにおけるセンシング技術に関しては、FBG 光ファイバセンサにより熱 収縮ひずみが、EFPI 光ファイバセンサではさらに硬化収縮ひずみも測定できることがわ かった。統合化プロセスの開発では、デモンストレータの開発に向けて、RTM プリフォー ムの深絞り技術の開発を行った。また、3 次元流動をシミュレートするため、Permeability の測定および流動解析ソフトの導入を行った。熱可塑性 FRP プレス成形については、マ トリックス樹脂の溶融状態をモニタリングしたスマート成形法を開発した。

種々の母構造への一体化に関して、その場観察が可能な小型負荷試験機を設計し、損 組み立て調整を行った。また、その場観察用の試験片についても検討し、実験システム の完成を図った。

(3) アクティブ・アダプティブ構造技術の開発

小型構造要素供試体の振動・音響制御試験を行い、目標である減衰係数の 20%以上の 向上および音響パワーの 30%以上の低減を達成した。柔軟宇宙アンテナ模擬構造物では、 形状・振動制御に対するアクティブ制御の有効性を実証した。電気粘性流体を用いた振動 制御では、梁要素供試体の製作、振動制御を行い、目標値である振動荷重の 50%低減を確 認した。パッシブ制御に関しては減衰材料として用いる形状記憶合金の応力-歪-温度 関係の計測、疲労試験および数値解析行い、その減衰効果を確認した。また、形状記憶合 金線材を埋込んだ複合材料を製作し、減衰計測を行い、減衰係数の 3 倍程度の向上を確 認した。

(4) アクチュエータ材料・素子の開発

Ti50-Ni50-X-Cu (X=0~10at %) 合金のアーク溶解とその後の液体急冷凝固法による箔、 帯板試料作成し、形状記憶特性(熱~回復力~ひずみ関係)評価のうち、DSC による変態 温度、変態温度幅およびひずみ回復量の Cu 含有量依存性を調べた。また、高温型につい ては、組成を変化させた Ru-Nb 合金の形状回復温度を確認するとともに、800~1200℃付近にわたる超高温型形状記憶合金の温度マップを作成するために Ru-Ta 合金系の DSC による変態温度分布を調べた。100mm以下の Ti (50at%) -Ni (50%at%) 細線素材を繰返し熱間・冷間圧延法により、世界最薄レベルの $10 \mu m$ まで薄くする製造技術の目途をつけることができた。磁性形状記憶合金については、多結晶バルク材において世界最大の磁気 歪み量 (1.4 テスラで 0.23%)を達成した。

(5) デモンストレータ試験

胴体実構造モデル試験で実施する 7 つのでデモンストレーション・テーマの実施内容 を内容を明らかにするとともに、「損傷検知および損傷抑制」ならびに「騒音および振動 低減」の各デモンストレータおよび試験装置の検討、基本設計を行い、成果を基本設計 報告書に取りまとめた。

(6) 総合調査研究

技術委員会および幹事会を開催し、研究実施計画の検討、研究成果の審議、研究グルー プ間の調整等を行うとともに、各研究開発グループの技術検討会に参加して進捗状況を把 握し、グループ間の調整を行った。また、すべての研究機関の研究成果の公開と技術交流、 対外アピールのためシンポジウムを開催した。

研究内容	機関名	研究所	所在地・住所	備考
ヘルスモニタリング技術の	東京大学大学院	武田研究室	東京都目黒区駒場4丁目6番	主たる
開発	新領域創成科学研究科		1号	研究所
"	(株)日立製作所	機械研究所	茨城県土浦市神立町 502 番	従たる
			地	研究所
スマートマニュファクチャリング	大阪市立大学	福田研究室	大阪府大阪市住吉区杉本 3	主たる
技術の開発	工学部		丁目3番138号	研究所
"	三菱重工業(株)	名古屋航空宇宙	愛知県名古屋市港区大江町	従たる
		システム製作所	10 番地	研究所
アクティブ・アダ プ ティブ	名古屋大学	松崎研究室	愛知県名古屋市千種区不老	主たる
構造技術の開発	大学院工学研究科		町 イ	
"	川崎重工業(株)	航空宇宙事業本	岐阜県各務原市川崎町 1 番	
		部 岐阜工場	地	研究所
11	富士重工業(株)	航空宇宙事業本	栃木県宇都宮市陽南1丁目1	
-		部宇都宮製作所	番11号	
"	(株)東芝	研究開発セ	神奈川県川崎市幸区小向東 (
		ンター	芝町1番地	研究所
アクチュエータ	東北大学	谷研究室	宮城県仙台市青葉区片平 2	主たる
材料・素子の開発	流体科学研究所		丁目1番1号	研究所
デモンストレータ	(財) 次世代金属・複合		東京都港区虎ノ門3丁目25	本部
試験	材料研究開発協会		番2号	

1.3 研究開発の実施場所

11	慶応義塾大学	岸研究室	神奈川県藤沢市遠藤 5322	共同研
	大学院政策 灯 77 研究科			究
"	川崎重工業(株)	航空宇宙事業本	岐阜県各務原市川崎町 1 番	従たる
		部 岐阜工場	地	研究所
//	富士重工業(株)	航空宇宙事業本	栃木県宇都宮市陽南1丁目1	従たる
		部宇都宮製作所	番11号	研究所
"	三菱重工業(株)	名古屋航空宇宙	愛知県名古屋市港区大江町	従たる
		システム製作所	10番地	研究所
総合調査研究	(財) 次世代金属・複合		東京都港区虎ノ門3丁目25	
	材料研究開発協会		番 2 号	研究所
"	ワシントン大学	田谷研究室	E Department of Mechanical	
			Engineering, University of	
			Washington, Seattle WA, 98195-2600	
			USA	
"	東京都立科学技術	田中研究室	東京都日野市旭ケ丘6丁目6	再委託
	大学 工学部		番	

1.4 研究開発体制

1.4.1 研究開発責任者(PL)

岸 輝雄 産業技術融合領域研究所 所長 慶応義塾大学大学院 政策メディア研究科 教授

1.4.2 研究組織

取りまとめ機関	研究項目	研究参加機関
(財)次世代金属・複合	(1) ヘルスモニタリング技術の開発	
材料健久開発協会	SL:武田 展雄	東京大学
(RIMCOF)	東京大学大学院教授	三菱電機(株)
		清水建設(株)
		(株)日立製作所
	(2) スマートマニュファクチャリング技術の開発	
	SL:福田 武人	大阪市立大学
	大阪市立大学 工学部長	石川島播磨重工業(株)
		三菱重工業(株)
	(3) アクティブ・アダプティブ構造技術の	
	開発	名古屋大学
	SL:松崎 雄嗣	ダイムラー・クライスラー
	名古屋大学大学院 教授	川崎重工業(株)
		富士重工業(株)
		(株)東芝

(4) アクチュエータ材料・素子の開発	
SL:谷 順二	東北大学
東北大学 流体科学研究所	弘前大学
所長	関東特殊製鋼(株)
	(株)トーキン
(5) デモンストレータ試験	
	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会
	慶応義塾大学
	川崎重工業 (株)
	富士重工業(株)
	三菱重工業(株)
(6) 総合調査研究	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会
	ワシントン大学
	東京都立科学技術大学

1.5 研究担当者氏名

1.5.1 研究開発

(1) ヘルスモニタリング技術の開発

氏	名	所 属・役 職	備考
武田	展雄	東京大学大学院 新領域創成科学研究科	SL
		先端エネルギー工学専攻 教授	
影山	和郎	東京大学大学院 工学系研究科	
		環境海洋工学専攻 教授	
榎	学	東京大学 先端科学技術研究センター 助教授	
宋	東烈	新エネルギー・産業技術総合開発機構 基盤技術研究開発室 産業技術員	(東京大学)
岡部	洋二	東京大学大学院 新領域創成科学研究科	
		先端エネルギー工学専攻 助手	
岡部	朋永	(財)次世代金属・複合材料研究開発協会 研究員	RIMCOF (東京大学)
梅村	敏雄	(財)次世代金属・複合材料研究開発協会 研究員	三菱電機(株)
尾崎	毅志	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 研究員	三菱電機(株)
樺島	重憲	(財)次世代金属・複合材料研究開発協会 研究員	三菱電機(株)
柴	慶治	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 研究員	清水建設(株)
岩城	英朗	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 研究員	清水建設(株)
山川	裕司	(財)次世代金属・複合材料研究開発協会 研究員	清水建設(株)
服部	敏雄	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 研究員	(株)日立製作所
青山	浩	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 研究員	(株)日立製作所
岩佐	正明	(財)次世代金属・複合材料研究開発協会 研究員	(株)日立製作所
田中	行平	(財)次世代金属・複合材料研究開発協会 研究員	(株)日立製作所

(2) スマートマニュファクチャリング技術の開発

氏	名	所 属・役 職	備考
福田	武人	大阪市立大学 工学部長	SL
元木	信弥	大阪市立大学 工学部 教授	
逢坂	勝彦	大阪市立大学 工学部 助教授	
山崎	友裕	大阪市立大学 工学部 助教授	
大島	信生	大阪市立大学 工学部 助手	
高坂	達郎	大阪市立大学 工学部 助手	
アフシャト	`タライエ	新エネルギー・産業技術総合開発機構 基盤技術研究開発室 産業技術員	(大阪市立大学)
盛田	英夫	(財)次世代金属・複合材料研究開発協会 研究員	石川島播磨重工業(株)
北出	真太郎	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 研究員	石川島播磨重工業(株)
柳沢	健一	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 研究員	石川島播磨重工業(株)
奥村	郁夫	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 研究員	石川島播磨重工業(株)
守屋	勝義	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 研究員	石川島播磨重工業(株)
山岸	謙二郎	(財)次世代金属・複合材料研究開発協会 研究員	石川島播磨重工業(株)
神野	昌明	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 研究員	三菱重工業(株)
酒井	茂	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 研究員	三菱重工業(株)
小笠原	頁 和郎	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 研究員	三菱重工業(株)
奥田	晃久	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 研究員	三菱重工業(株)

(3) アクティブ・アダプティブ構造技術の開発

氏 名	所 属・役 職	備考
松崎 雄嗣	名古屋大学大学院 工学研究科 教授	SL
池田 忠繁	名古屋大学大学院 工学研究科 助教授	
ビジャヤン・	名古屋大学大学院 工学研究科 助手	
パブラジ		
フェリックス・ニケチ	(財) 次世代金属·複合材料研究開発開発協会 研究員	ダ イムラー・クライスラー
クリスチャン・ボ ラー	(財)次世代金属·複合材料研究開発開発協会 研究員	タ゛イムラー・ クライスラー
ヘ゜ーター・	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会 研究員	ダ イムラー・クライスラー
コンスタンツアー		
ヘ ルント・シレーター	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会 研究員	ダ イムラー・ クライスラー
レンカ スワミー・	(財)次世代金属·複合材料研究開発開発協会 研究員	タ゛イムラー・ クライスラー
ラベ ンド ラン		
三田 富雄	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会 研究員	川崎重工業(株)
高橋 晃作	(財)次世代金属・複合材料研究開発開発協会 研究員	川崎重工業(株)
高木 淳二	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会 研究員	富士重工業(株)
町田 茂	(財)次世代金属・複合材料研究開発開発協会 研究員	富士重工業(株)
萩 俊之	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会 研究員	富士重工業(株)
内田 憲男	(財) 次世代金属·複合材料研究開発開発協会 研究員	(株)東芝

林	卓郎	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会	研究員	(株)東芝
長安	克芳	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会	研究員	(株)東芝
高橋	博	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会	研究員	(株)東芝
中村	博昭	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会	研究員	(株)東芝
原口	貴史	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会	研究員	(株)東芝
小林	登	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会	研究員	(株) 東芝

(4) アクチュエータ材料・素子の開発

氏	名	所 属・役 職	備考
谷	順二	東北大学 流体科学研究所 所長	SL
裘	進浩	東北大学 流体科学研究所 助教授	
高木	敏行	東北大学 流体科学研究所 教授	
松本	實	東北大学 素材工学研究所	
古屋	泰文	弘前大学 理工学部 教授	
厳	泰永	新エネルギー・産業技術総合開発機構 基盤技術研究開発室 産業技術員	(東北大学)
相場	満	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会 研究員	関東特殊製鋼(株)
喜瀬	純男	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会 研究員	関東特殊製鋼(株)
山内	清	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会 研究員	(株) トーキン
武田	進	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会 研究員	(株) トーキン

(5) デモンストレータ試験

.

氏	名	所 属・役 職	備	考
岸	輝雄	慶応義塾大学 大学院 教授	ΡL	
三田	彰	慶応義塾大学 大学院 助教授		
張	炳國	新エネルギー・産業技術総合開発機構 基盤技術研究開発室 産業技術員	(融合研	•)
三田	富雄	(財)次世代金属·複合材料研究開発開発協会 研究員	川崎重工	業 (株)
木元	順一	(財)次世代金属·複合材料研究開発開発協会 研究員	川崎重工	業 (株)
高橋	晃作	(財)次世代金属·複合材料研究開発開発協会 研究員	川崎重工	業(株)
筒井	寛明	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会 研究員	川崎重工	業(株)
高木	淳二	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会 研究員	富士重工	業 (株)
安藤	則雄	(財)次世代金属・複合材料研究開発開発協会 研究員	富士重工	業 (株)
戸塚	正一郎	(財)次世代金属・複合材料研究開発開発協会 研究員	富士重工	業(株)
鵜飼	崇志	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会 研究員	富士重工	業(株)
小林	孝行	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会 研究員	富士重工	業(株)
荻巣	敏充	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会 研究員	富士重工	業 (株)
伊原オ	、 幹成	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会 研究員	三菱重工	業 (株)
白井	雄二郎	(財)次世代金属·複合材料研究開発開発協会 研究員	三菱重工	業 (株)
鎌田	清敏	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会 研究員	三菱重工	業 (株)
神野	昌明	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会 研究員	三菱重工	業 (株)

— 14 —

長井	謙宏	(財)次世代金属·複合材料研究開発開発協会	研究員		三菱重工業(株)
酒井	茂	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会	研究員		三菱重工業(株)
鎗	孝志	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会	研究員		三菱重工業(株)
坂本	昭	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会			
		知的材料・構造システム研究開発センター	センター長		
宮崎	崇夫	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会	同センター	技術部長	
佐藤	純一	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会	同センター	主幹研究員	
田島	直之	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会	同センター	主幹研究員	
櫻井	建夫	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会	同センター	主幹研究員	
篠崎	吉太郎	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会	同センター	主幹研究員	
野田	稔	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会	同センター	部長	_
張	珠恵	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会	同センター	研究員	
具	滋皓	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会	同センター	研究員	
大塚	和弘	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会	同センター	研究員	
中島	未知	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会	同センター	研究員	

(6) 総合調査研究

氏	名	所 属・役 職	備	考
田谷	稔	ワシントン大学 機械工学科 教授	再委託:新アク	・チュエー
			タ材料の開発	
森	勉	ワシントン大学 機械工学科 客員研究員	"	
田川	哲哉	ワシントン大学 機械工学科 客員研究員	"	
Adulh	akim	ワシントン大学 機械工学科 大学院生	"	
Almaj	id			
田中	信雄	東京都立科学技術大学 工学部 教授	再委託:スマー	ト構造物
			の静粛化に関	する研究
坂本	昭	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会		
		知的材料・構造システム研究開発センター センター長		
宮崎	崇夫	(財)次世代金属・複合材料研究開発開発協会 同センター 技術部長		
佐藤	純一	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会 同センター 主幹研究員		
田島	直之	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会 同センター 主幹研究員		
櫻井	建夫	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会 同センター 主幹研究員		
篠崎	吉太郎	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会 同センター 主幹研究員		
野田	稔	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会 同センター 部長		
張	珠恵	(財) 次世代金属・複合材料研究開発開発協会 同センター 研究員		

1.5.2 技術委員会

.

(1) 知的材	料・構造シ	シス	テム技術委員会
委	員長 (PL)	岸 輝	雄	産業技術融合領域研究所 所長
				慶応義塾大学大学院 政策・メディア研究科 教授
委	員 (SL)	武田 展	雄	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 教授
委	員 (SL)	福田 武	人	大阪市立大学 工学部長
委	員 (SL)	松崎 雄	嗣	名古屋大学大学院 工学研究科 教授
委	員(SL)	谷 順	<u>i</u>	東北大学 流体科学研究所 所長
委	員	相場	満	関東特殊製鋼(株)研究開発部 主任研究員
委	員	内田 憲	男	(株)東芝 研究開発センター 機械システムラボラトリー 技監
委	員	ト部	啓	物質工学工業技術研究所複合材料部構造ゲループ主任研究官
委	員	尾崎 毅	志	三菱電機 (株) 先端技術総合研究所 金属・セラミックス技術部 主席研究員
委	員	加藤和	昭	(株) 富士セラッミクス 開発部 部長
委	員	上村 康		イーエーデ ィーエス・ジ ャハ゜ン (株) マネージ ャー・ インタ ストリアル・ コーホ゜レーション
委	員	川神 裕	志	日立電線 (株) オプトロシステム研究所 第 3 部 部長
委	員	菊島 義	弘	機械技術研究所 極限技術部 振動制御研究室 主任研究官
委	員	北野 彰	彦	東レ(株) 複合材料研究所 主任研究員
委	員	兒玉	優	三菱重工業(株) 名古屋航空宇宙システム製作所 研究部 次長
委	員	三田 富	雄	川崎重工業(株)岐阜研究所 機体技術研究部構造研究ゲループ ゲループ長
委	員	柴 慶	治	清水建設(株) 技術研究所 エンジニアリング研究開発部 主任研究員
委	員	関谷	忠	名古屋工業技術研究所 せうミックス基礎部電子セラミックス研究室主任研究官
委	員	高木 淳		富士重工業 (株) 宇都宮製作 第 1 技術部 部長
委	員	田中信	雄	東京都立科学技術大学 工学部 機械システム工学科 教授
委	員	田谷	稔	ワシントン大学 機械工学科 教授
委	員	服部 敏	雄	(株)日立製作所 機械研究所 主幹研究員
委	員	林直	義	(株)本田技術研究所 栃木研究所 エグゼクティブチーフエンジニア
委	員	松原 秀	彰	(財) ファインセラミックスセンター 試験研究所 主幹グループリーダー
委	員	村上由利	子	ダイムラー・クライスラー日本(株) 技術リサーチ部 課長代理
委	員	盛田 英:	夫	石川島播磨重工業(株) 基盤技術研究所 材料技術部 課長
委	員	山内	清	(株)トーキン 技術開発本部 基礎材料開発部 担当部長
事	務 局	坂本	昭	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 知的材料・構造システム研究開発センター
				センター長
事	務 局	宮崎 崇	夫	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 同センター 技術部長
事	務 局	佐藤 純		(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 同センター 主幹研究員
事	務 局	田島直	之	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 同センター 主幹研究員
事	務 局	櫻井建	夫	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 同センター 主幹研究員
事	務 局	篠崎吉太」	郎	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 同センター 主幹研究員
事	務 局	野田	稔	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 同センター 部長
事	務 局	張 珠	恵	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 同センター 研究員

(2) デモンストレータ部会

委員長(PL)	岸 輝雄	産業技術融合領域研究所 所長
		慶応義塾大学大学院 政策・メディア研究科 教授
委 員(SL)	武田 展雄	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 教授
委 員(SL)	福田 武人	大阪市立大学 工学部長
委 員(SL)	松崎 雄嗣	名古屋大学大学院 工学研究科 教授
委 員(SL)	谷 順二	東北大学 流体科学研究所 所長
委員	高木 淳二	富士重工業 (株) 宇都宮製作 第 1 技術部 部長
委員	三田 富雄	川崎重工業 (株) 岐阜研究所 機体技術研究部構造研究が ループ が ループ長
委員	伊原木幹成	三菱重工業 (株) 名古屋航空宇宙システム製作所 研究部
		主席研究員
委員	盛田 英夫	石川島播磨重工業(株) 基盤技術研究所 材料技術部 課長
委員	影山 和郎	東京大学大学院 工学系研究科 教授
委員	古屋 泰文	弘前大学 理工学部 教授
委員	浅沼 博	千葉大学 工学部 助教授
事務局	坂本 昭	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 知的材料・構造システム研究開発センター
		センター長
事務局	宮崎 崇夫	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 同センター 技術部長
事務局	佐藤 純	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 同センター 主幹研究員
事務局	田島 直之	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 同センター 主幹研究員
事務局	櫻井 建夫	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 同センター 主幹研究員
事務局	張 珠恵	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 同センター 研究員
(3) デモン	ストレータ分類	
委員長(PL)	岸 輝雄	産業技術融合領域研究所 所長
		慶応義塾大学大学院 政策・メディア研究科 教授
委員	高木 淳二	富士重工業(株)宇都宮製作 第1技術部 部長
委員	三田 富雄	川崎重工業(株)岐阜研究所 機体技術研究部構造研究が ループ り゙ループ長
委員	伊原木幹成	三菱重工業(株) 名古屋航空宇宙システム製作所 研究部
		主席研究員
委員	盛田 英夫	石川島播磨重工業(株) 基盤技術研究所 材料技術部 課長
アドバイザ委員	武田 展雄	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 教授
アドバイザ委員	福田 武人	大阪市立大学 工学部長
アドバイザ委員	松崎 雄嗣	名古屋大学大学院 工学研究科 教授
アドバイザ委員	谷順二	東北大学 流体科学研究所 所長
事務局	坂本 昭	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 知的材料・構造システム研究開発センター センター長
事務局	宮崎 崇夫	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 同センター 技術部長
事務局	佐藤 純一	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 同センター 主幹研究員
事務局	田島 直之	(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会 同センター 主幹研究員

 事務局
 櫻井 建夫 (財)次世代金属・複合材料研究開発協会 同センター 主幹研究員

 事務局
 張 珠恵 (財)次世代金属・複合材料研究開発協会 同センター 研究員

2. 研究目標と成果

(1) ヘルスモニタリング技術の開発

高性能センサシステム技術の開発においては、平成 10-11 年度の成果を踏まえ,高層 建築物用ヘルスモニタリングシステム実証試験に対する一連の開発(実装用 FBG(変位, 歪み,温度)センサモジュールの開発,同モジュールに対する基本特性試験,システム の設計および実装,計測,伝送用光ファイバの敷設)を実施した。

構造健全性自己診断・損傷制御システム技術の開発においては、細径 FBG センサ埋込 みによる一般的な複合材料積層板中の 90 度層クラックおよび層間剥離検知実験、および その理論解析を行い、検出方法としての有効性を実証した。

モデル構造、部分実構造への適用化技術の開発においては、建設中の高層建築物に 64 ものセンサを実装し,既往の研究成果を大幅に上回る実証システムとなった。実証試験の 試験計測において良好な結果を得たことから,3年間に想定した研究目標(建築構造物用 ヘルスモニタリングシステムの開発)は概ね達成された。

また、人工衛星構造体 CFRP 表皮へ適用する、導入用光ファイバが着脱可能な埋込みコネクタを開発するとともに、開発済みの温度・歪同時高精度測定システムを CFRP 表皮ヒートパイプ埋込みサンドイッチパネルに適用して、熱真空試験を実施し、温度・歪・損傷検出システムとしての実用性を実証した。

さらに、極低温・真空環境槽内における超電導磁石荷重支持体の疲労試験を行い、光透 過検出装置により内部損傷を計測し、疲労損傷の発生に伴なう透過光の減少量と剛性の低 下率に相関関係を定量化できることを確認し、ヘルスモニタリング技術として光透過法の 有効性を実証した。

(2) スマートマニュファクチャリング技術の開発

センシング技術の開発については、基本的に H11 年度までに得られた各センサの測定機能 について、改良を行い、実用化への技術開発を目的に検討を行った。その結果、EFPI 光ファ イバセンサに加えて、FBG 光ファイバセンサでも熱収縮ひずみが測定できることがわかった。 また、フローフロント・硬化状態検出多機能センサについては、CFRP への適用が可能となるな ど、センシング技術の改良、実用化について成果が得られた。

モデリング技術および統合化プロセスシステムの開発について、本年度は、モデリング技術 に基づき、成形シミュレーションを行って、最適プロセス制御を完成すべく、制御アルゴリズ ムの開発等の基礎技術の確立を目標とした。検討の結果、本研究で採用している成形法におい て、目標であった最適制御アルゴリズムを作成し、さらに、オートクレーブ成形および精密プ レス成形については、モニタリング項目は限られたものであるが、実際に成形システムを製作 し、成形実験によりその有用性を実証することができた。

母構造とセンサ・アクチュエータ等の一体化技術の開発では、まず、センサの成形品内部への埋め込みによる測定への影響を明らかにし、センサの埋め込み技術を確立することを目的と

して、EFPI 光ファイバセンサおよび圧電セラミックスセンサについて検討した。その結果、 EFPI センサについては、成形圧力のひずみ測定へ及ぼす影響がわかった。また、圧電セラミ ックスセンサについては、埋め込みに適するセンサの改良・開発に成功した。センサ・アクチ ュエータ埋め込みによる母構造の力学的性質への影響の解明については、センサ・アクチュエ ータ埋め込み部の破壊過程をその場観察により調べ、埋め込みによる強度特性への影響を明ら かにする手法を採用する。

(3) アクティブ・アダプティブ構造技術の開発

スマート構造物のアクティブ・アダプティブ制御システム技術の研究では、形状記憶合金の減衰、 疲労・繰返特性、それらの振動数、振幅による影響の計測を行い、基礎材料データを得ると共に、 提案しているモデルが試験結果を定量的予測することができることを実証した。また、分布定数系 矩形平板に対するスマート・クラスターセンサを提案し、実験によりその正当性を実証した。

複雑構造要素への適用化技術の開発では、圧電セラミックスによる複合材料板要素(600×600mm²)の振動・騒音制御、圧電フィルムセンサ・圧電セラミックスアクチュエータによる柔軟 宇宙アンテナ構造物(直径 1m)の形状・振動制御、電気粘性流体により減衰特性を改善した複合 材料梁要素(長さ 800mm)の振動制御、形状記憶合金を埋込んだ複合材料梁の振動制御を行い、 目標値を越える制御効果が得られ、構造要素または小型構造物に対するアクティブ・アダプティブ 構造技術の有効性を実証した。さらに、試験により得られたデータに基づき、デモンストレータお よび実構造物要素にアクティブ・アダプティブ構造技術を適用する場合の材料素子対する要求仕様 とその制御効果を示した。

(4) アクチュエータ材料・素子の開発

速い応答性を有するSMAアクチュエータの製作について、液体急冷凝固法による微 細結晶方位を制御した箔、帯板試料を作製成した。DSC による変態温度、変態温度幅お よびひずみ回復量の Cu 含有量依存性を調べ、Cu=8~15at%に大きな変形と早い応答性の アクチュエータ材料があることを指摘した。Cu≧8at%では、通常の溶解加工材料は、偏 析などにより粒界脆化を起こしてアクチュエータ素材としては使えなかったものを、急 冷微細・均質化組織制御により克服した。急冷後に短時間焼鈍化させ、結晶方位を揃える と、約2倍に目標値に達する回復変形と疲労ボケが少なくなることを見出して来ている。 高温 SMA について、1000℃以上の相変態温度を有する高温型SMAの創製については、 組成を変化させた等比Ru-Nb合金の形状回復温度を確認するとともに、600~1000℃ 付近にわたる変態温度の組成依存性マップを作成することができ、等比 Ru - Ta 系では 1000℃を越える温度での熱弾性型相変態を DSC などで確認しており、当初の目標は 80% 以上達成できた。SMA 薄箔の作製について、Ti(50at%)-Ni(50%at%)細線素材を繰返し熱 間・冷間圧延絞込み加工法により、世界最薄レベルの 10µm まで薄くする製造技術の目 途をつけることができ、知的材料・構造システムへの適用が期待される。それらの材料の 形状記憶特性や強度特性も開発した引張りマイクロ試験機付きのレーザ顕微鏡等で調べ ることができた。

磁性形状記憶合金材料の作製に関する研究については以下の成果が得られた。①Fe を 含む多結晶バルク材において熱および磁場による形状記憶効果を出現させた。②多結晶 バルク材において世界で最大の磁気ひずみ量(1.4 テスラで 0.23%)を達成した。③スッ パタ膜において加熱・冷却による 2 方向の形状記憶効果を出現させた。④スッパタ膜に おいて磁場による形状記憶効果を出現させた。⑤スッパタ膜を利用した形状記憶素子を 作製した。

(5) デモンストレータ試験

"胴体実構造モデル試験"で実施する7つのデモンストレーション・テーマの実施内 容を明確にするとともに、デモンストレータの諸元・構造様式概要・概略日程を設定し た。結果を推進委員会および技術委員会で報告・審議し、了承を得た。引き続き平成 12 年度から 14 年度にわたる開発全体スケジュールを明らかにした。

「損傷検知および損傷抑制」ならびに「騒音および振動低減」の各デモンストレーション・テーマの達成目標に対する達成度検証方法、試験内容、供試パネルの諸元・構造、 デモンストレータ全体の諸元・構造ならびに強度・剛性、試験装置、計測方法・装置、 試験シーケンス、デモンストレータと試験装置間のインターフェース、設計・製造・試 験日程、等の解析および技術検討を実施した。解析および技術検討結果は、適時、担当会 社が一堂に会して調整・議論を行い、共通認識を持つとともに相互に問題解決を図り、 基本設計を進めた。

プロジェクト・リーダ、サブ・リーダ、国研および参画企業との検討・審議も併せ実施しタ。成果を基本設計報告書としてまとめ、デモンストレータ部会および同分科会で 報告・審議し、了承を得、次年度の詳細設計に進めることになった。

(6) 総合調査研究

技術委員会及び幹事会を開催し、研究実施計画の検討、研究成果の審議、研究グループ 間の調整等を行った。研究開発の進捗に関しては、毎月の実施内容ならびに翌月の実施計 画、問題点等について、各研究開発グループおよび再委託先からの報告を取りまとめ、月 次報告としてプロジェクトの全研究開発関係者に配布し、各研究テーマの進捗状況をプロ ジェクト参画者全員が適時把握できるようにした。また、各研究開発グループの技術検討 会に参加し、進捗状況を直接把握するとともに、研究開発の方向性・妥当性について検討 した。さらに、集中研における研究への補完的研究開発として、スマート構造物の静粛化 に関する研究を国内大学へ、新アクチュエータ材料の研究を海外の大学に委託し、所期の 成果を得た。

なお、シンポジウムを平成12年12月5,6日の二日間にわたって開催し、プロジェクト の全グループの成果発表とパネル討論を実施、産官学の有識者からアドバイス、コメント を頂くとともに、プロジェクトの内、外の研究者・技術者との技術交流を通じて、研究開 発の一層の発展を図った。

第I章

ī r

ヘルスモニタリング技術の開発

1. 研	f究開発の成果と達成状況・	23
1.1	研究開発の成果	23
	要 約	23
1.	1.1 ヘルスモニタリング・グループ全体	24
1.	1.2 大型建築・土木構造物の常時ヘルスモニタリング技術	27
1.	1.3 光ファイバセンサによる人工衛星のヘルスモニタリング	38
1.1	1.4 光透過型センサシステムによる半透明複合材料の	
	ヘルスモニタリング技術の構築	48
1.2	達成状況	58
1.3	結論	58
2.研	究発表・講演、文献、特許等の状況	60
2.1	研究発表・講演	60
2.2	文献	61
2.3	特許	61
2.4	その他の公表(プレス発表等)・・・・・	61

I. ヘルスモニタリング技術の開発

1. 研究開発の成果と達成状況

1.1 研究開発の成果

要約

本研究は、構造システムのリアルタイム自己検知・診断、および損傷制御を行うヘルスモニタ リングシステムの開発を行うこと目的に、次の3つの技術開発を行っている。(1)高性能センサシ ステム技術の開発、(2)構造健全性自己診断・損傷制御システム技術の開発、(3)モデル構造、部分 実構造への適用化技術の開発。各研究課題ごとの研究成果概要を以下に示す。

参加機関名	研究成果概要
清水建設	平成10・11年度の成果を踏まえ、高層建築物用ヘルスモニタリングシステム
	実証試験に対する一連の開発(実装用FBG(変位, 歪み, 温度)センサモジュー
	ルの開発、同モジュールに対する基本特性試験、システムの設計および実装、計
	測, 伝送用光ファイバの敷設)を実施した。FBGセンサの実装数は64に達し,
	既往の研究成果を大幅に上回る実証システムとなった。実証試験の試験計測にお
	いて良好な結果を得たことから、3年間に想定した研究目標(建築構造物用ヘル
	スモニタリングシステムの開発)は概ね達成された。
三菱電機	人工衛星構造体CFRP表皮へ適用する、導入用光ファイバが着脱可能な埋込み
	コネクタを開発するとともに、開発済みの温度・歪同時高精度測定システムを
	CFRP表皮ヒートパイプ埋込みサンドイッチパネルに適用して、熱真空試験を実
	施し、温度・歪・損傷検出システムとしての実用性を実証した。
日立製作所	極低温・真空環境槽内における超電導磁石荷重支持体の疲労試験を行い、光
	透過検出装置により内部損傷を計測し、疲労損傷の発生に伴なう透過光の減少
	量と剛性の低下率に相関関係を定量化できることを確認し、ヘルスモニタリン
	グ技術として光透過法の有効性を実証した。

-Summary-

FY2000 Research Summary of Structural Health Monitoring Group

The structural health monitoring group is developing a health monitoring system which conducts real-time damage detection and self-diagnosis as well as damage control in light-weight composite structural systems. The research themes include: (1) development of high-performance sensor system technology, (2) development of a damage detection and self-diagnosis system for structural integrity, and (3) development of application technology for model structures. Summary of research accomplishment is presented for each participating organization.

- (1) Shimizu Co.: Further Development and improvement of strain, temperature and displacement sensor elements using FBG sensors for large-scale civil infrastructures. Application to a real high-story building using 64 sensor elements and successful demonstration.
- (2) Mitsubishi Electric Co.: Development of optical fiber connectors for FBG sensors in CFRP satellite structures. Application of simultaneous strain and temperature measurement system to CFRP face sheets of honeycomb structures in space chamber tests.
- (3) Hitachi Co.: Application of light transmission and reflection sensor system for semitransparent composites in vacuum and low-temperature fatigue tests. Quantified evaluation of loss in light transparency and reflectivity due to microscopic fatigue damage in practical environments.

1.1.1 ヘルスモニタリング・グループ全体

(1)研究開発の目的

軽量複合材を中心とする構造システムの構造健全性、耐久性を評価し、かつ保証する方法の確 立が、構造システムの安全性・信頼性を確保し、設計・製造からメインテナンス・修理までのラ イフサイクルコストを低減するために求められている。そのためには、運用中の構造システムに 生じる損傷の種類、位置、サイズを精密に同定し、損傷発生・進展メカニズムとセンサ情報の相 関性から、構造健全性をリアルタイムで自己検知・診断、さらには損傷制御を行うシステムの構 築が必要である。

本研究は、構造システムのリアルタイム自己検知・診断、および損傷制御を行うヘルスモニタ リングシステムを開発することを目的とする。達成目標は、次の3つの技術開発の達成である。

- (1) 高性能センサシステム技術の開発
- (2)構造健全性自己診断・損傷制御システム技術の開発
- (3) モデル構造、部分実構造への適用化技術の開発

(2) 全体計画における 12 年度の位置付け

(a) グループ全体

高性能センサシステム技術の開発

	研	究	項	日		10	11	12	13	14	参加機関
<u>(a) 光ファイ/</u>	<u> ドセンサシ</u>	マテム技	術の構築	L,							
(a-1) 光ファイ	バセンサ	・歪・温度	そ・荷重権	食知技術の	構築						MD,S,HS
(a-2) 光ファイ	バセンサ	損傷検知	コシステム	」の開発							の3社
(a-3) 光ファイ	バセンサ	複合化技	を術の開発	Ě							

			- - - -
	の開発	損傷許容設計のための複合材料微視的損傷検出技術は	東京大学
レスモニタリング技術の構築	材のへル	光透過・光反射型センサシステムによる半透明複合	日立製作所
帛 発	支術の開	人工衛星損傷許容設計のためのヘルスモニタリング	三菱電機
阿の研究開発	ン + - - - - - - - - - - - - -	大型建築・土木構造物健全性の常時モニタリングセ、	清水建設
		研究目的	参加機関名
		1機関毎	(b) 各参加
		菱電機、HS: 日立製作所、S: 清水建設、	注) MD: 三
S		3.構造	(c) 高層建築
HS HS		<u> </u>	(b) 高速車両
MD		目構体コンポーネント	(a) 人工衛星
12 13 14 参加機関	10 11	ぞ 究 頃 日	
		構造、部分実構造への適用化技術の開発	モデル権
すべて		注住自己診断・自己損傷制御システムの構築	(c) 構造健全
		日本 AEX/22 ーンセーマン H22 International AEX	の理
			(h-2) 損傷発
フ を		発生・進展メカニズムとセンサ出力情報の相関性 	(b-1) 損傷発
ユンチ			価法の確
		主・進展メカニズムとセンサ出力情報の相関性評	(b) 損傷発生
	-	遣・物理量変化と光ファイバセンサ出力情報の相 平価法の確立	(a-1) 力学量 [雪/雪]
すべて			確立
		出力情報と力学量・物理量変化の相関性評価法の	(a) センサ出
12 13 14 参加機関	10 11	研究項目	
		全性自己診断・損傷制御技術の開発	構造健全
HS		2・光反射型損傷センサシステムの開発	(b) 光透過型

À 光ファイバ FBG センサの建築土木、 繁に成功してきた。 サ出力情報と実際に生じている力学量・物理量変化とを定量的に関係づける基礎解析モデルの構 合材料システムの微視的損傷発生・進展プロセスの実験的・解析的研究成果を土台に、上記セン 己診断・損傷制御システム技術の開発においては、これまで東京大学において蓄積されてきた複 構造の損傷検出用光ファイバセンサシステムの設計、などが挙げられる。第二に、構造健全性自 タリング技術の基礎実験による実証、(3) 建築土木への適用を目指した、FBG センサ応用、ひず に成功してきた。 温度、 変位測定用光ファイバ多点センサシステムの設計、(4)人工衛星 CFRP 表皮ハニカム さらに第三に、 モデル構造、 人工衛星、 高速車両への適用性を具体的に明らかにすること 部分実構造への適用化技術の開発においては、 Ň 11 × これらの成果をもとに、12 年度においては、基礎要素技術開発と位置付けられる高性能センサ システム技術の開発を着実に行いつつも、モデル構造、部分実構造などの実用構造レベルへの実 証を目指した適用化技術により主眼をおいて研究を進めた。具体的には、(1) 建築中の高層建築 物の履歴型ダンパーに FBG センサ応用、ひずみ、温度、変位測定用光ファイバ多点センサシステ ムを適用すること、(2) 人工衛星 CFRP 表皮ハニカム構造の宇宙環境試験に損傷検出用光ファイ バセンサシステムを適用すること、および、実用コネクタ技術の開発、(3) 磁気浮上高速車両へ の適用を目指した半透明複合材荷重支持体構造の光透過・光反射型センサシステムによるヘルス モニタリング技術の構築、などの目的達成を目指した。当然のことながら、センサ出力情報と実 際に生じている力学量・物理量変化や損傷発生・進展メカニズムとを定量的に関係づける基礎解 析モデルの構築は、東京大学との共同研究により裏付けるものとした。

(3) 12 年度研究成果のまとめ

清水建設は、平成 10-11 年度の成果を踏まえ,高層建築物用ヘルスモニタリングシステム実証 試験に対する一連の開発(実装用 FBG(変位,歪み,温度)センサモジュールの開発,同モジュ ールに対する基本特性試験,システムの設計および実装,計測,伝送用光ファイバの敷設)を実 施した。FBG センサの実装数は 64 に達し,既往の研究成果を大幅に上回る実証システムとなっ た。実証試験の試験計測において良好な結果を得たことから,3年間に想定した研究目標(建築 構造物用ヘルスモニタリングシステムの開発)は概ね達成された。

三菱電機は、人工衛星構造体 CFRP 表皮へ適用する、導入用光ファイバが着脱可能な埋込みコ ネクタを開発するとともに、開発済みの温度・歪同時高精度測定システムを CFRP 表皮ヒートパ イプ埋込みサンドイッチパネルに適用して、熱真空試験を実施し、温度・歪・損傷検出システム としての実用性を実証した。

日立製作所は、極低温・真空環境槽内における超電導磁石荷重支持体の疲労試験を行い、光透 過検出装置により内部損傷を計測し、疲労損傷の発生に伴なう透過光の減少量と剛性の低下率に 相関関係を定量化できることを確認し、ヘルスモニタリング技術として光透過法の有効性を実証 した。

東京大学は、細径 FBG センサ埋込みによる一般的な複合材料積層板中の 90 度層クラックおよび層間剥離検知実験、およびその理論解析を行い、検出方法としての有効性を実証した。

1.1.2 大型建築・土木構造物の常時ヘルスモニタリング技術

(1) 目的

本研究開発は、現在広く建設されているビル、道路等の大型建築・土木構造物の構造健 全性を保証する手法として、光ファイバセンサ等を用いたヘルスモニタリングシステムの 構築を目的としている。

(2) 研究開発項目

平成10年度,11年度の研究開発成果を踏まえて,以下の研究開発を実施した。

i) FBG(Fiber Bragg Grating)型光ファイバセンサモジュールの開発および特性試験

ii) 建築構造物用ヘルスモニタリングシステム実証試験

(3) FBG センサモジュールの開発および特性試験

FBG 型光ファイバセンサ(以下,FBG センサと記す)を大型建築・土木構造物への適用するため,FBG ひずみセンサモジュール,FBG 温度センサモジュール,およびFBG 変位センサモジュールの製作を行い,これらに対する基本特性試験を実施した。

i) FBG ひずみセンサモジュール

大型建築・土木構造物に対するひずみ計測においては、従来から電気抵抗変化を利用したひずみゲージが広く用いられてきた。一方、FBG センサが持つ以下の特長

- ・ 電磁ノイズの影響を受けない
- ・ 多重化(1本の計測ケーブルに複数のFBGを設置する)が可能
- 高感度
- 長寿命

から、ひずみゲージの代替として FBG センサの適用が大きく期待されている。

しかしながら,実際に大型建築・土木構造物へ FBG センサの適用を想定する場合,FBG センサ素子自体が細径(UV コートタイプの場合約φ250μm)であることなどから,センサ設置作業に細心の注意を払う必要があり,建設現場における作業性の低下,ひいてはセンサ自体の信頼性の低下が懸念される。

このため、大型建築・土木構造物に容易に適用することを可能とする FBG ひずみセン サモジュールを Fig.1.1.2.1 に示す通り製作した。

本センサモジュールは FBG センサ素子を, 溝加工を施した金属箔に接着した単純な形状であるため, FBG センサ自体の特性を損なうことなく, 比較的容易に建設現場に適用することが可能となった。



Fig.1.1.2.1 FBG ひずみセンサモジュール

ii) FBG 温度センサモジュール

FBG センサはひずみ変化の検知の他に,温度変化に対する利用が可能である。FBG センサ素子のひずみ,温度双方に対する感度(Bragg 波長の変動量)は,

(ひずみ感度) ≒ 1.2pm/µ strain … (1)
 (温度感度) ≒ 13pm/℃ … (2)

であるため,大型建築・土木構造物に対する各種計測を行う際には,温度変化に対する補 正を行うことが必須となる。

そのため, FBG ひずみセンサモジュールと同様に,建設現場での作業性,信頼性を考慮 した FBG 温度センサモジュールを Fig.1.1.2.2 のように製作した。



Fig.1.1.2.2 FBG 温度センサモジュール

本モジュールに対する基本特性試験の結果を Fig.1.1.2.3 に示す。



Fig.1.1.2.3 FBG 温度センサモジュールの特性例

51 的容易に建設現場への適用が可能である。 (1 の結果、本センサモジュールが温度変化のみ検知し、ひずみ変化に対し とが分かる。 ひずみセンサモジュールと同様に金属箔を用いた形状であるため、比較 ては検知しな

iii) FBG 変位センサモジュール

よび建築構造の一部分に設置し繰り返し荷重試験を実施した 平成 11 年度に試作した FBG 変位センサモジュール(既報)に対して、 (Fig.1.1.2.4 を参照)。 基本特性試験お



Fig.1.1.2.4 FBG 変位センサモジュールに対する繰り返し荷重試験 (既報)

線形性が損なわれたモジュール個体があった) ように、耐久性に一部問題が発見された。(繰り返し荷重試験後、変位センサモジュールの しかしながら、本試作モジュールに対する繰り返し荷重試験の結果, Fig.1.1.2.5 に示す



Fig.1.1.2.5 FBG 変位センサモジュールの基本特性変化

FBG 変位センサモジュール (試作品) 内のコイルバネの固定に一部不具合があったこと に依ることが分解後判明したため,同,対策を施した FBG センサモジュールを Fig.1.1.2.6 に示す通り製作した。





Fig.1.1.2.6 FBG 変位センサモジュール

iv) FBG センサの多重化に伴う問題

本研究開発において使用している FBG センサ計測ユニット(米国 Micron Optics 社 FBG-IS)の緒元を Table.1.1.2.1 に示す。

Table.1.1.2.1 FBG センサ計測ユニットの緒元



検知周波数	1530nm-1570nm
分解能	lpm 未満
精度	± 10 pm
光損失	12bB
測定周波数	50Hz
上限 FBG 数	30
最小 FBG 間隔	0.5nm

これによると、検知可能波長は 1530nm~1570nm(帯域 40nm)であり、(1)式よりひ ずみ量に換算すると、

(計測可能全ひずみ量(ダイナミックレンジ)) ≒33,000 µ strain …(3) となる。

一方,FBG センサが持つ長所として挙げられる「多重化」とは概ね,(3)に示されるダ イナミックレンジを WDM(Wavelength Division Multiplexing;波長多重)方式を用い て分割していることを指す。

すなわち, FBG センサの多重化の上限は, FBG センサ計測ユニットの緒元に加え, 各 FBG センサが測定する歪み範囲によって制限される。たとえば, 各々の FBG センサに初 期張力を 3000μ strain 付加し, $\pm 3000 \mu$ strain のひずみ測定を期待する場合には, FBG の多重化の上限は約6個となる。

(4) 建築構造物用ヘルスモニタリングシステム実証試験

i) 対象構造の検討および設定

さまざまな形式の「大型土木・建築構造物」が建設されている。ビルを一例としても, 鉄骨造,鉄筋コンクリート造,鉄骨鉄筋コンクリート造などが挙げられよう。更に免震, 制振機構を備えたビル等も現在多数建築されている。

本研究開発における実証試験として, Fig.1.1.2.7 に示すような, 東京都内に施工中の鉄 骨造 12 階建てのビルを設定した。本ビルは, 既報および Fig.1.1.2.8 に示すような間柱ダ ンパによる制振架構を持つビルであり, この制振架構の動作が構造物全体の健全性を診断 する重要な要素となる。

Table.1.1.2.2 実装 FBG センサモジュールの構成

①制振架構監視用	FBG 変位センサモジュール	12
	FBG 温度センサモジュール	2
②建物全体形状監視用	FBG ひずみセンサモジュール	12
	FBG 温度センサモジュール	4
③床形状監視用	FBG ひずみセンサモジュール	27
	FBG 温度センサモジュール	1

また,本実証試験においては,計測ユニットを従来使用していた FBG-IS(米国 Micron Optics 社製)に代わり,FBG-SLI(同社)を使用した。本機は複数チャネルの同時測定が可能で,かつ各チャネルのダイナミックレンジが広いため,本実証試験のような大規模測定に適当と判断した。同機の緒元を Table.1.1.2.3 に示す。

1able.1.1.2.5 計例ニークトの相比		
Number of Channels	4	
Number of FBGs / Channel	64	
Wavelength Range	1520nm-1570nm	
Optical Power / Channel	>-10 dBm	
Optical Dynamic Range	>30 dB	
Resolution	>1 pm	
Laser Linewidth	>1 GHz	
Scan Frequency	100 Hz	

Table.1.1.2.3 計測ユニットの緒元

これらを用いたヘルスモニタリングシステム(計測システム)の模式図を Fig.1.1.2.9 に 示す。(Table.1.1.2.2 に示す①, ②項を常時監視用として配置した)



(ひずみセンサモジュールの実装)



(柱部の実装状況)



(変位センサモジュールの実装)



(実装結果 (耐火被覆後)) (制振ダンパ部の実装結果) Fig.1.1.2.10 実証試験対象構造物への FBG センサモジュールの実装

実装された FBG センサモジュールは同様に Fig.1.1.2.10 に示すように,鉄骨部への耐 火被覆等が施され、不可視となる。なお、その際配線に用いた光ケーブルの破断等は発生 しなかった。



(制振ダンパ部への実装状況)



iv) ヘルスモニタリングシステムの稼働確認

による稼働確認の模様と, OTDR 方式を用いた導通状況を Fig.1.1.2.11 に示す。 実装した FBG センサシステムに対して稼働確認を実施した。 FBG 計測ユニット(新規)



(FBG 計測ユニットによる稼働確認)

Fig.1.1.2.11 ヘルスモニタリングシステムの稼働確認 (OTDR 方式による導通状況の確認)

前述の通り,光ケーブルの破断等は見られず, 実装した FBG センサモジュールおよび

れない。 光配線の動作が確認できた。 また, 定常状態においては Fig.1.1.2.12 に示すように Bragg 波長の変動はほとんど見ら



Fig.1.1.2.12 FBG 計測ユニッ トによるヘルスモニタリングシステム計測例

(5) 結論

大型建築・土木構造物の構造健全性を保証する手段として光ファイバセンサ等を用いた ヘルスモニタリングシステムの構築を行い,以下の結果が得られた。

- 大型建築・土木構造物への FBG 型光ファイバセンサの適用可能性を確認した。(平成 10 年度)
- 大型建築・土木構造物への適用を想定した FBG 型光ファイバセンサモジュールの製作 を行い、一連の基本特性試験を実施した。(平成 11,12 年度)
- ヘルスモニタリングシステムを構築する対象構造を想定し、FBG センサモジュールを 用いたヘルスモニタリングシステムの設計を行った。(平成 11,12 年度)
- 実際の建築構造物に対し上記ヘルスモニタリングシステムを実装し、一連の試験計測 を実施したところ、良好な結果を得た。(平成12年度)

(6) まとめ

ー連の本研究開発によって、光ファイバセンサを用いた大型建築・土木構造物むけヘル スモニタリングシステムの構築が可能となったと考えられる。しかしながら、同構造物の 供用時の長期計測,および地震等の災害時の計測値を基にした損傷部位の特定等,検討す るべき課題が明らかとなった。

加えて、本研究開発のキーデバイスである FBG 計測ユニットの性能,安定性の向上や、 建築・土木構造物向け測定への最適化など、今後の開発に向けた問題点も見いだすことが できた。本研究開発の成果を広く一般化するためには、これらの解決は不可欠である。

今後も本研究開発の成果を生かし新たな形で研究開発を継続する所存である。

1.1.3 光ファイバセンサによる人工衛星構造のヘルスモニタリング

(1) 目的

本開発は、「ヘルスモニタリング技術の開発」のうち、人工衛星構造を対象としたヘ ルスモニタリングシステムに関するもので、当該システムの衛星実構造への適用化を目指 すものである。衛星構造におけるヘルスモニタリングシステムの実用化のためには、複合 材料構造への光ファイバの適用技術の開発、宇宙環境下での光ファイバセンサシステムの 性能保証、衛星用複合材料における損傷検出技術の開発がポイントとなる。そこで本年度 は、これらのポイントに対応して、衛星用複合材料構造に埋め込み可能な光ファイバコネ クタの開発、模擬宇宙環境における FBG ファイバセンサシステムの動作検証、衛星用複 合材料構造に特有の熱応力に起因する損傷の検出を行なった。

(2) 複合材料構造埋め込み型光ファイバコネクタの開発

光ファイバセンサを用いたヘルスモニタリングに関しては盛んな検討が行われているが、 構造へのセンサの装着や埋め込みの方法に関する報告は多くない。実際の構造物へのセン サの適用を考える時、折れ易く、再接続が困難な光ファイバの取り扱いの難しさが高いハ ードルとなっている。また、開発レベルで製作される光ファイバ埋め込み複合材料構造の 多くは、積層板の端部から光ファイバのリード部が出ていることが多いが、このようなコ ンフィギュレーションでは構造端部のトリミングを行なうことができない。衛星用ヘルス モニタリングシステムの実用化のため、複合材料構造に埋め込みが可能で、リード部の光 ファイバとの着脱が可能な光ファイバコネクタを開発することでこのような問題の解決を 図った。

図 1.1.3-1 に、開発した光ファイバコネクタの概要を示す。複合材料構造中に埋め込ま れるガイド部品はステンレス製であり、構造内部の光ファイバと構造外部の光ファイバの 双方の端部を突き合わせて接続するための V 溝を有する接続基板は、アルミナ製である。 使用する光ファイバには、外径 40µm および 125µm の2種類を想定した。本コネクタ は、ガイド部品により光ファイバを複合材料構造の表面に引き出すことにより、構造端部 のトリミングを可能にしている。光ファイバはガイド部品に沿って曲げられるので、図 1.1.3-2 のようにファイバの曲げ半径と通光損失の関係を実験的に調べ、ガイド部品の曲 率を透過損失がほとんど発生しない最小の値 15mm とした。本光ファイバコネクタを複 合材料構造中に埋め込むと図 1.1.3-3 のようであり、この時コネクタ部に生ずる損失は 0.4dB 程度と実用上問題ないものであった。図 1.1.3-4 は、このコネクタを用いて光ファ イバを埋め込んだ複合材料表皮ヒートパイプパネルである。本パネルは、衛星構造特有の、 CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic)を表皮とし、ヒートパイプを模擬したアルミ部材が 埋め込まれたハニカムサンドイッチパネルである。


図 1.1.3-1 複合材料構造埋め込み型光ファイバコネクタ



図 1.1.3-2 光ファイバの曲げ半径と通光損失の関係

(3) 宇宙環境下での光ファイバセンサシステムの機能検証

衛星構造のヘルスモニタリングを行なう場合、歪みと温度の双方を精度良く測定する 必要があり、 99 年度に FBG センサを用いた歪み・温度検出システムの開発を行なって、 結果を報告している。今回は、この FBG センサシステムの機能検証を、スペースチャン バにより模擬された宇宙環境下で実施した。

図 1.1.3-5 に検証実験の概要を示す。本検証実験では、FBG センサシステムにより図 1.1.3-6 に示すような複合材料表皮ヒートパイプパネルの温度および歪みの分布を測定す る。ここで用いるパネルは、アンモニアガスを含むアクティブなヒートパイプを有するも のである。ヒートパイプパネルは、表皮とヒートパイプの熱膨張率差による損傷が表皮に 発生しないよう注意深い設計を要求するものであり、運用環境下での表皮の熱歪みおよび 温度分布の監視が望まれる構造部材である。図 1.1.3-6 中、A および B の位置に、FBG セ ンサが配されており、同位置に比較データ取得のための熱電対を取り付けた。試料をスペ ースチャンパ内に設置した後、チャンパ内を 1.32×10⁴Pa (1.0×10⁶Torr) 以上の高真空 とし、衛星構体を模擬するベースプレートの温度を 0℃に保って、発熱部に 10W、20W の熱を発生させ、試料の歪みおよび温度測定を実施した。また、このパネルの有限要素モ デルを作成し、応力分布を求めた。結果を図 1.1.3-7 および図 1.1.3-8 に示すが、FBG によ り測定された温度は熱電対による測定結果と一致し、同じく FBG により測定された歪み 値は、有限要素解析により計算された値とよく一致した。以上により、開発された FBG センサシステムが宇宙環境下において問題なく機能することが確認された。



図 1.1.3-5 FBG センサシステム機能検証実験の概要



図 1.1.3-6 検証実験に用いたヒートパイプパネル



(4) FBG センサシステムによる衛星構造の損傷検出

前節で、複合材料表皮ヒートパイプパネルの表皮の歪み・温度モニタリングを実施した が、パネルの環境温度が許容範囲を超えた場合には図 1.1.3-9 に示すような、熱応力によ る損傷が表皮部に生ずる。そこで、FBG センサを埋め込んだ CFRP 積層板を用い、熱応 力により生ずる損傷の検出を試みた。

図 1.1.3-10 に実験の手順を示す。FBG センサの埋め込みを行なったのは、高弾性ピッ チ系炭素繊維 K13C (三菱化学)と、シアネートエステル樹脂 EX1515 (Bryte Technologies) からなる CFRP で、[0/90]s なる積層構成を有する積層板である。積層板の寸法は、30× 500mm で、長手方向を 0 °方向とした。外径 125µm の FBG センサ (NTT-AT)を、2プ ライある 90 °層の中間に 0 °方向に沿って配置し、真空バギング成形により積層板を成 形した。FBG センサは UV 硬化エポキシが被覆されているが、ゲージ部については被覆 を取り除いた。成形された積層板を、ヒートパイプを模擬した 30×30×500mm なるアル ミ棒に、構造用エポキシ接着剤で接着し、120℃でキュアした。キュア後常温まで冷却さ れる過程で、アルミ棒と積層板との熱膨張率差によって、積層板へ埋め込む前、積層板 埋め込み後、アルミ棒との接着後で、スペクトルアナライザ-Q8384 (アドバンテスト) により分析した。図 1.1.3-11 にアルミ棒への接着前後でのスペクトル波形を示す。積層板 に埋め込んだ場合、成形時の残留応力によりピーク波長が若干シフトするもののスペクト ル波形は崩れていない。これに対し、熱応力により損傷が生じた場合、ピーク波長がシフ トするのみならず、スペクトル波形の崩れが観測された。

上記のようなスペクトル波形の崩れがどのような過程を経て起るのかを調べるため、 冷却により損傷が発生する過程を AE (Acoustic Emission)および FBG センサの双方を用い てモニタした。図 1.1.3-12 は、冷却過程の温度と AE のカウント数の時間変化を、図 1.1.3-13 は、時刻 T1~T6 (図 1.1.3-12 中に表示)における反射光のスペクトルを示す。これらを 見ると、AE により損傷が最初に検出される時刻 T3 において、反射光スペクトルの対称 性の崩れが観測されており、以降損傷の累積と共にスペクトル波形が大きく崩れていく過 程が明らかに見て取れる。Takeda らは積層板に発生するトランスバースクラックが FBG センサのゲージ部に不均一な歪みを発生させ、反射波のスペクトル波形を崩すことを報告 しているが¹⁾、ここでも同様の現象が生じていると考えられる。

以上のことから、FBG センサを用いることにより衛星用複合材料構造に発生する損傷 を、従来から損傷検出法として実績のある AE と比較して遜色のない感度で検出できるこ とがわかった。実際的には、反射光スペクトルの対称性を監視する、反値幅の広がりを測 定するといった方法が考えられる。



図 1.1.3-9 熱応力により複合材料に発生する損傷



図 1.1.3-10 FBG センサによる損傷検出実験の手順



図 1.1.3-11 損傷の発生前後での反射光スペクトルの波形



図 1.1.3-12 AE による損傷発生のモニタリング結果



1.1.3 - 13損傷発生過程での反射光スペク トル波形の変化

X

(5) まとめ

開発、 出法確立のための見通しが得られた。 境下の温度・ ٧, 料構造の損傷検出を行な Ń 阉 テムが、 雇用へ FBG なす \neq 歪み測定の機能が確認さ 従来と比べ K Чh 4 11 V. タ K J ΥI て容別 J \checkmark 5 た。 の宇宙環境下での機能検証、 グ実用化のため、 に製作でき 11 の結果、 れた 光 N ò ት V 911 複合材料埋め込 S 4 た イバセ ñ \$ FBG en \mathbb{R} 1 FBG 4 4 \cap \mathbf{V} ď 19 や埋光 4 ñ Ħ 4 ñ 5 \checkmark ት 5 4 N Ś ñ V Э > 俺 А **(**' \neq 9 围 Ś 4 K X 甉 ΥI Ч 阉 7 至 Ц 乤 5 11 の損 の手の E ≯ Ŕ 揻 Ľ び 豪 基 □⟩ Ŕ 1 掖 Y 扙 Э

参考文献

1) N. Takeda, T. Kosaka, M. Hara, 6th Japan Int. SAMPE Symposium (1999), p. 979

- 46 -

1. 調査者

氏名:長井 謙宏

所属:(財)次世代金属・複合材料研究開発協会(RIMCOF)

2. 調査時期

2001年3月4日 ~ 2001年3月8日

- 3. 調査場所
 - SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structure and Materials
 - SPIE's 6th Annual International Symposium on NDE for Health Monitoring and Diagnostics (Newport Beach Marriott Hotel and Tennis Club : Newport Beach, California USA)
- 4. 調查目的

デモンストレータ試験に関連し、知的構造・材料に関する最新の技術動向について調査を行う。

5. 調查内容概要

今回参加したシンポジウムは、本カテゴリーにおける世界最大規模のもので、毎年開催されている. 発表数も Smart および NDE あわせて656件と桁違いに多いものである(その内約5%は当日キャンセルであった).

光ファイバに関するセンシングでは、そのほとんどがFBG(ファイバに刻まれた格子を利用した局所ひずみセンサ)に関するものがほとんどであった。FBGの技術自体は既に確立されているため、現在では多チャンネル化といかに実用的なシステムを構築するかに主眼がおかれている。中にはNASAのバックアップも受けている企業の3000個のFBGを光ファイバに入れる壮大な報告(原理的な数で実例は200程度)もあり、もはや実構造への適用を想定した実用化研究がなされている印象を受けた。ただし、ひずみ計測の一手法という位置づけであり、それによりどんな損傷をどの程度の精度で検出するかといった具体的な損傷検知に関する報告はなかった。

アクチュエータの分野ではピエゾとSMA(形状記憶合金)に関する研究が主流であった。ただし、従来からの課題である、ピエゾによるアクチュエーティング荷重の小ささと、SMAの応答性の鈍さについては、画期的な解決案は見られなかった。試験片レベルではよくても、実機レベルに適用するにはまだまだハードルが高いと思われる。DARPAの報告でも、大きなモデルでは結局超音波モータなどの従来型のアクチュエータを使用している。

全体を通しての印象は、米国の発表では基礎研究に関する報告はあまりなく、実用化研究が多かった。それも、同じ課題に対し何人かの研究者が異なるアプローチで取り組むといった日本では考えられない開発体制がしかれており(日本では1つのアプローチを決めればそれで猪突猛進する)、懐の深さを感じた。米国以外では、カナダやヨーロッパあたりが後を追っており、航空宇宙機器に対してではないが、トンネル、ダム等のインフラストラクチャに対しては既に実用化されていた。アジアをはじめとする他の国々では特に注目すべき研究発表はなかった。

以上

1.1.4 光透過型センサシステムによる半透明複合材のヘルスモニタリング技術の構築

(1) 目的

近年、MRI (Magnetic Resonance Imaging, 核磁気共鳴) 装置、SOR (Synchrotron Orbital Radiation, 放射光)装置、大型加速器および磁気浮上列車など、超電導磁石を利 用した機器の開発が進められている。超電導コイルは、液体ヘリウムによって 4.2K に冷 却されて使用される。このコイルを大気温度(300K)の磁石外槽内に支持する荷重支持 体は、充分な剛性と強度の他に、液体ヘリウムの消費量を抑えるために高い断熱特性が要 求される。このため、荷重支持体はFRP(繊維強化プラスチックス)で、製作されてい る 1)2)。荷重支持体を構成しているFRPが何らかの損傷を受けその機械的曲げ剛性が低 下すると、超電導コイルが異常振動を起こし、クエンチ(超電導破壊)につながるおそれ がある。このため、支持体の剛性に影響を及ぼすFRPの損傷をリアルタイムで検出する ために、ひずみセンサ、加速度センサ等が使用されているが、いずれも超電導磁石による 電気ノイズの影響を受けやすく、これらの除去処理が必要となる。また、層間剥離のよう なFRP特有の損傷を検出するためにはひずみセンサを多数設置する必要がありセンサ 用信号線による熱侵入も無視できなくなる。本研究では、極低温、強磁場環境下で、荷重 支持体の剛性の低下を監視できるヘルスモニタリング法の開発を目的として、FRP透過 光を利用したFRPの劣化・損傷モニタリング法を検討し、荷重支持体の疲労試験を行い ながら、剛性の低下を引き起こす内部損傷の検出法について検討した。

(2) 透過光を利用したアルミナ FRP の損傷検出

i) 試験方法

本研究では図 1.1.4-1 に示すようなアルミナ FRP 成形品を使用した。強化繊維は直径 1 5 μmの γ - アルミナ繊維(85%: γ - A 1 2 O 3、15%: S i O 2)、マトリック



図 1.1.4-1 アルミナ繊維強化複合材料製荷重支持体

スはビスフェノールF型エポキシ樹脂である。成形方法は一方向プリプレグシートを配向 角を変えながら金型表面に積層した擬似等方とし、プレスによって成形した。繊維含有率 はV_f=50%である。荷重支持体は液体へリウムが満たされた容器を、真空容器である磁 石外槽内で支持する部材である。このため FRP の板厚をできる限り小さくし、熱抵抗を 高くとっている。本荷重支持体の平均の板厚は2mmである。また、軸方向、軸直角方向 の剛性、強度を大きくするためにコーン形状としている¹⁾。そのくびれ部内周側には熱遮 蔽用円板が取り付けられる。そして、コーンの一端が内槽(低温側)へ、もう一端が外槽側(大 気温度側)へ、それぞれ金属製の円板に締結される。

荷重支持体が繰り返し荷重を受けていく過程での、FRP中の損傷の発生、成長をとら える目的で、図 1.1.4-2 に示すような軸直角方向の負荷試験を行った。試験は室温大気中 で行った。試験中の荷重支持体の剛性は荷重と試験治具の変位量から算出した。荷重振幅 は35kNとし、応力比R=0、繰返し速度f=1Hzとした。

ii) 透過光イメージ測定法

本荷重支持体に用いられているアルミナ FRP は板厚が約2mmと薄いため光を良く通 す。FRP 内部に樹脂割れ、層間剥離などの損傷が生じると、それらは「影」の形で認識で きる ²⁾⁻⁸⁾。荷重支持体の損傷を調べるために疲労試験中に試験を3回中断し、図 1.1.4·3 に示す装置構成でアルミナ FRP の透過光イメージを測定した。荷重支持体はターンテー ブル上に載せられ、光源となる20Wの蛍光灯により試験片の外部からFRPを照らした。



図 1.1.4-2 荷重支持体の疲労試験装置

- 49 -

FRP透過光は CCD カメラでとらえられ、画像処理ソフトを持つパーソナルコンピュー タで、明度、損傷の形状を分析した。

iii) 試験結果 透過光は欠陥の位置が把握しやすいように、コーンを周方向に4分割して撮像した。4分割した領域には便宜上時計の盤面に見立て、図1.1.4-3に示すように12時、3時、6時、および9時方向とした。荷重は12時から6時の方向に加えた。

図 1.1.4-4 には主に変化の生じた9時方向の領域のFRP透過光のイメージを示す。図 を見ると、剛性が 3.6%低下した場合の観察結果においてFRP平滑部に細かいキズ状の 「影」が生じている。これは、FRPを構成しているエポキシ樹脂の割れを捉えているも のと考えられる。試験終了後、透過光観察結果にて大きな「影」を生じていた部分につい て試験片を切り出し、SEM 観察を行った。繊維の配向が異なっている層間で 50μm程度 の割れが生じていることが分かった。



図 1.1.4-3 光透過を利用した損傷検出システムの構成

室温大気中の荷重支持体の疲労試験において、コーンくびれ部の熱遮蔽板の境界部から 層間剥離が生じ、この損傷を透過光により捉えられることが分かった。この板厚2mm程 度のアルミナ FRP の透光性を利用した荷重支持体の剛性低下量を検知するシステムにつ いて、次に考察する。

(3) 極低温環境下での疲労試験

i) 透過光測定ユニット

前述のように、荷重支持体の剛性低下を引き起こすアルミナFRPの損傷の検出に、透 過光が有効であることが分かった。しかし、本手法は光源として蛍光灯を、透過光イメー ジの撮像にはCCDカメラを使用したために、超電導磁石のような極低温・真空環境での 使用は不可能である。また、赤外光を含む蛍光灯の光を荷重支持体に照射することは、熱 侵入の点で問題がある。



(a) before test



(b) stiffness -3.6 %



(c) stiffness -6.8 %

図 1.1.4-4 光透過を利用した損傷検出結果



図 1.1.4.5 LEDの発光スペクトル

極低温・真空環境に置かれたアルミナFRP製荷重支持体の剛性低下量を検出する方法 として、フォトトランジスタと発光素子を用いた透過光測定ユニットを試作した。アルミ ナFRPの損傷を敏感に捉える波長は400~800nmであるため⁴⁰、光源としては赤 色のLED (Light emitted diode)素子を使用した。図 1.1.4-5 に、本実験で用いたLED の発光スペクトルを示す。損傷検出感度の高い640nmを中心とした波長を有する光を 出力する。



Amb. temperature plate

	Young's Modulus
	E (GPa)
Alumina/FRP	71 (7.6 for thickness)
Plates (Steel)	200
Radiation shield(AI)	70

図 1.1.4-6 荷重支持体の解析モデル



図 1.1.4.7 荷重支持体の応力分布

コーン型荷重支持体の損傷の発生する可能性の高い部位の透過光量を測定する必要が あるが、その位置の決定のために荷重支持体のFEM計算を実施した。図 1.1.4-6 に計算 モデルを示す。負荷は荷重支持体下面プレートに軸直角方向の面分布荷重として与えた。 図 1.1.4-7 には、荷重支持体のミゼス相当応力分布を等高線の形で示す。コーンくびれ部 の側面部の、熱遮蔽板境界部に最大応力が発生している。(2) iii)節に述べた疲労試験結果 においてもこの部位から層間剥離が発生していたため、本実験においても、この部位を中 心に透過光強度を測定した。

本実験で試作した透過光測定ユニットの構造を図 1.1.4-8 に示す。また、図 1.1.4-9 に荷 重支持体へ固定した状況を示す。光源の赤色LEDはコーンくびれ部の内側にはめ込まれ た熱遮蔽板上に、4個円弧状に配置した。また、このLEDにFRPをはさんで対向させ るようにフォトトランジスタをコーンくびれ部外側に配置した。LED、フォトトランジ スタはいずれもFRP表面から約1mm離して固定した。

ii) 極低温環境槽

極低温・真空環境下における、この透過光測定ユニットの有効性を確認するために、荷 重支持体の極低温疲労試験を実施した。試験片は先に示したコーン型荷重支持体を用い、 実際の磁石での使用状態を模擬するために、図 1.1.4-10 に示す環境槽内で繰返し負荷を与 えた。環境槽の外槽はステンレス製の箱型溶接構造であり、内部は真空に保たれる。内部 にはFRP製コーン型支持体4つによって支えられた低温側治具が中央に位置している。 低温側治具はステンレス(SUS304)の箱型溶接構造をしている。この箱型の低温側 治具が実際の超電導磁石のコイル内槽(液体へリウム温度)を模擬している。この低温側 治具はヘリウム冷凍機3台によって10K程度にまで冷却される。試験片は低温側治具の



図 1.1.4-8 荷重支持体の透過光測定ユニットの構成







(a) Inner side of the FRP cone

図 1.1.4-9 透過光測定ユニット



図 1.1.4·10 荷重支持体疲労試験装置

端部にボルトによって固定される。この試験片に荷重を負荷するために常温側治具を取り 付ける。常温側治具上部を油圧アクチュエ-タにつながった負荷ロッドによって上下に引 圧負荷する。これによって、試験片には軸直角方向の荷重が負荷される。試験中、試験片 の剛性は負荷荷重を、負荷ロッドの変位と低温側治具の変位の差で除した値から求めた。 本実験では、荷重振幅を35kNとし、応力比R=0、繰返し速度f=1Hzとした。 iii) 試験結果

試験片の剛性Kを試験開始時の剛性K_iで除した剛性比K/K_iと、繰返し数Nを試験片の破壊までの回数N_fで除した寿命比N/N_fとの関係を図 1.1.4·11 に示す。N/N_fが 0.9 を超える付近で剛性の急激な低下が生じている。そしてK/K_iが 0.6 まで低下するとその後、損傷領域が急激に広がり、荷重を負荷できなくなった。



1.0

ン部の温度は試験開

25

55

iv) 損傷領域と剛性低下の関係

透過光強度測定ユニットによって捉えられた損傷領域の大きさと剛性との関係を調べ るために、有限要素法による計算を行った。

損傷部位を模擬するために、コーンくびれ部側面部(3時、9時の方向の円周角 90° の範囲)に縦弾性係数を1MPaとした要素を導入した。そして、その損傷部の軸方向高 さを変えて計算を行った。損傷部を導入した計算モデルを図 1.1.4·13 に示す。損傷部はコ ーンくびれ部をはさむ形で設けた。模擬損傷部面積Sをコーン全体の面積S₀で除した値 と、剛性比との関係を図 1.1.4·14 に*印で示す。計算結果によるとS/S₀が 0.01 を超え るまでは、剛性がほとんど変化していない。これは、コーンくびれ部内周側に固定された 熱遮蔽板により、この近傍のFRPの変形が拘束されているためと考えられる。

本実験ではフォトトランジスタとLEDの組み合わせを、コーン円周方向4点に取り付けたため、コーンくびれ部全周の透過光強度を測定してはいない。ここでは、図1.1.4-15 において、透過光強度変化が顕著に見られた3時方向のフォトトランジスタによる透過光 強度比が損傷の大きさに比例すると仮定して、次式にて損傷面積を試算した。

$$S = (1 - \frac{A}{A_i}) \times S_{phot} \cdots \qquad \exists (1.1.4 - 1)$$

ここで *S*_{phot}は、フォトトランジスタで測定している FRP の面積とし、本計算では図 1.1.4-14 の計算結果の初期値に一致するように決めた。結果を図 1.1.4-14 に〇印で示す。 損傷面積比 S / S oが 0.01を超えるまでは剛性がほとんど変化していないことが分かった。

本実験により、荷重支持体の剛性が低下する前の微細なコーンくびれ部の損傷を透過光 強度より検出できることが分かった。本手法は、荷重支持体の剛性低下量をアルミナ FRP の透過光強度より求めるものであり、透過光強度の検出に光学素子を使用しているため、 超電導磁石等の電磁ノイズの影響も受けにくい。また、供試体に直接センサを接触させな いため、極低温環境においても熱侵入を引き起こさない検出が可能である。



図 1.1.4-14 模擬損傷部面積比と剛性比の関係



図 1.1.4-13 損傷部を導入した計算モデル

(4) 結論

極低温・真空環境下におかれたアルミナFRP構造物のひとつである荷重支持体の剛性 低下を求める方法として、FRP透過光を利用した新たな検査法を考案した。そして、荷 重支持体専用の透過光測定ユニットを試作し、荷重支持体の極低温。真空疲労試験に適用 した。その結果以下の結論を得た。

i)アルミナFRP製荷重支持体の疲労試験を室温大気中にて行い、剛性の低下と透過光イ メージとして捉えたFRPの微小な樹脂割れ、層間剥離との良い相関を得た。

ii)極低温、真空環境下で使用可能なLEDとフォトトランジスタによる透過光測定ユニットを試作した。LEDの発光中心波長を640nmとすることで、FRPの発熱を引き起こさない透過光強度測定が可能となった。

iii)荷重支持体の極低温、真空環境下での疲労試験を行い、透過光測定ユニットによるFR P透過光強度を実測した。その結果、剛性低下を大きく引き起こす前段階の、FRPの初 期損傷発生を、透過光により検出でき、損傷の発生部位を透過光測定ユニットで検出可能 なことが分かった。このシステムにより荷重支持体の剛性低下2.5%を検知可能とした。

参考文献

(1) 青山 博,服部 敏雄,岩佐 正明,根本 武夫,園部 正,滝沢 照広,渡邊 洋之,福士 慶滋,一 ノ瀬 道幸,寺井 元昭, 日本機械学会論文集, 62-598A(1997), 221-228.

(2) 青山 博,渡邊 洋之,寺井 元昭, 日本機械学会論文集, 64-682A(1998), 43-48.

(3) 山本 俊浩,百武 秀, 日本機械学会論文集, 63-608A(1997), 124-130.

(4) Benaron, D. A., Laser Focus World, (1994), 79-82.

- (5) Benarson, D. A., Lenox, M. A., and Stevenson, D. K., SPIE 1641, (1992), 35-45.
- (6) Chance, B., SPIE 1641, (1992), 162-169.

(7) Benarson, D. A., and Stevenson, D. K., SCIENCE 259, (1993), 1463-1466.

(8) Wang, L., Ho, P. P., Liu, C., Zhang, G., and Alfano, R. R., SCIENCE 253, (1991), 769-771.

1.2 達成状況

各研究テーマごとの達成状況を以下にまとめる。

(1) 大型建築・土木構造物の常時モニタリングセンサ技術の開発

平成 11 年度にプロトタイプを制作した高層建築物用 FBG センサモジュールの基本試験をふまえて、実際の高層建築物(東京都内Nビル)にて変位、歪み、温度の各 FBG センサモジュールを実装したヘルスモニタリングシステム実証実験を実施した。実装したFBG センサモジュールは 60 以上であり、世界的にも類をみない大規模なシステムとなった。また、対象構造物に対する本システムの稼働も施工中において確認され、今後本システムの実用化(市場における商品化)に向けた開発に受け継ぐことが容易となった。

また、本システムの構築は、当社のみならず、光ファイバメーカ、計測器メーカ、計測 業者等、様々な産業の成果の集約であることも併せて示したい。今後も継続して上記産業 と連携し、本システムの推進を行う所存である。

(2) 光ファイバセンサによる人工衛星構造のヘルスモニタリングシステムの開発

衛星用ヘルスモニタリングシステム実用化の鍵となる、(1)材料構造埋め込み型光フ ァイバコネクタの開発、(2)宇宙環境における光ファイバセンサシステムの機能検証、 (3)光ファイバセンサシステムによる損傷検出技術の検討を実施した。(1)について は、衛星用複合材料構造への光ファイバセンサシステムの適用を容易にする、実用的な光 ファイバコネクタの開発に成功した。(2)については、衛星の軌道環境を模擬する熱真 空チャンバ内で光ファイバセンサシステムが温度/歪みを問題なく測定できることが確認 された。(3)については、FBGセンサからの反射光のスペクトル形状を観測すること により、衛星用複合材料構造に特有の熱応力破壊が明確に検出できるようになった。以上 の研究開発により、衛星用ヘルスモニタリングシステムの実用化に確実な見通しが立つと ともに、実際の衛星システムにヘルスモニタリングシステムを適用した場合に、コスト低 下、納期短縮、高機能化といったメリットがあることが改めて明らかになった。

(3) 光透過・光反射型センサシステムによる半透明複合材のヘルスモニタリング技術の構築

LEDとフォトトランジスタを利用した,光透過型損傷検出システムを開発し,半透明 なアルミナ繊維強化タイプのFRP製断熱荷重支持体の疲労試験中の損傷検出を,真空, 極低温環境下で可能とした。LEDの発光中心波長を640nmとすることで,荷重支持 体への熱侵入のない損傷検出が可能となった。このシステムによって荷重支持体の剛性低 下2.5%を検知可能とした。

1.3 結論

本研究では、構造システムのリアルタイム自己検知・診断、および損傷制御を行うヘルスモニタリングシステムの開発を目的に、次の3つの技術開発を行っている。(1)高性能センサシステム技術の開発、(2)構造健全性自己診断・損傷制御システム技術の開発、(3) モデル構造、部分実構造への適用化技術の開発。 12 年度においては、基礎要素技術開発と位置付けられる高性能センサシステム技術の 開発を着実に行いつつも、モデル構造、部分実構造などの実用構造レベルへの実証を目指 した適用化技術により主眼をおいて研究を進めた。具体的には、(1)建築中の高層建築物 の履歴型ダンパーに FBG センサ応用、ひずみ、温度、変位測定用光ファイバ多点センサ システムを適用すること、(2)人工衛星 CFRP 表皮ハニカム構造の宇宙環境試験に損傷 検出用光ファイバセンサシステムを適用すること、および、実用コネクタ技術の開発、(3) 磁気浮上高速車両への適用を目指した半透明複合材荷重支持体構造の光透過・光反射型セ ンサシステムによるヘルスモニタリング技術の構築、などで世界的にも評価される重要な 成果を挙げた。また、当然のことながら、センサ出力情報と実際に生じている力学量・物 理量変化や損傷発生・進展メカニズムとを定量的に関係づける基礎解析モデルの構築は、 東京大学との共同研究により裏付けるものとした。

ここに記載した3社については、本年度にて本プロジェクトにおける研究開発は終了 する。しかし、各社ともに、建築土木、人工衛星、高速車両の分野のヘルスモニタリング 技術では、世界的に見てもトップレベルであり、これまで得られた日本独自のヘルスモニ タリング技術を生かした、さらに内容の充実した円滑な研究開発が進められることを期待 する。東京大学とも継続的な共同研究を行う予定であり、世界的にも最も実用化に近い日 本独自のヘルスモニタリング技術の更なる発展に、各方面からの引き続きの支援を期待し たい。

- 2. 研究発表・講演、文献、特許等の状況
- 2.1 研究発表·講演
- (1) 岩城英朗,山川裕司,三田彰, "FBG変位センサの履歴型制振架構への適用検討", 2000 年度日本建築学会大会,2000 年 9 月 4-7 日,郡山.
- (2) H. Iwaki, H. Yamakawa and A. Mita, "FBG-Based Displacement and Strain Sensors for Health Monitoring of Smart Structures", 5th Int. Conf. on Motion and Vibration Control, December 4-8, 2000, Sydney.
- (3) 岩城英朗、山川裕司、柴慶治、"FBG センサを用いた建築構造物用ヘルスモニタリン グシステム"、第2回「知的材料・構造システム」シンポジウム講演集、(財)次世代金 属・複合材料研究開発協会、2000年12月5-6日, pp. 39-42.
- (4) 岩城英朗,山川裕司,柴慶治,"スマート建築構造物に対する FBG センサを用いたヘルスモニタリングシステムの開発",第 50 回理論応用力学講演会講演論文集,2001年1月25日,東京, pp.537-538.
- (5) H. Iwaki, H. Yamakawa and A. Mita, "Health Monitoring System Using FBG-Based Sensors for a 12-story Building with Column Dampers", Proc. SPIE, Vol. 4330, SPIE's 8th Int. Symp. Smart Structures and Materials, March 4-8, 2001, Newport Beach, CA, in press.
- (6) S. Kabashima, T. Ozaki and N. Takeda, "Strain and Temperature Monitoring in Composite Sandwich Panels in Space Environment", 14th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors (OFS2000), Venice, October 11-13, 2000, pp. 126-129.
- (7) 樺島重憲, 尾崎毅志, 梅村敏夫, 武田展雄, "衛星用ヘルスモニタリング技術の開発", 第 2 回「知的材料・構造システム」シンポジウム講演集, (財)次世代金属・複合材料 研究開発協会, 2000年12月5-6日, pp. 31-34.
- (8) 樺島重憲,尾崎毅志,武田展雄,"人工衛星構造のためのヘルスモニタリングシステム",第 50 回理論応用力学講演会講演論文集,2001 年 1 月 23-25 日,東京, pp. 541-542.
- (9) S. Kabashima, T. Ozaki and N. Takeda, "Structural Health Monitoring using FBG Sensor in Space Environment", Proc. SPIE, Vol. 4332, SPIE's 8th Int. Symp. Smart Structures and Materials, March 4-8, 2001, Newport Beach, CA, in press.
- (10) H. Aoyama, K. Tanaka and N. Takeda, "Health Monitoring Technologies for Fiber Reinforced Plastics", Proc. 10th Int. Symp. Nondestructive Characterization of Materials, Iketani Science and Technology Foundation, June 26-30, 2000, Karuizawa, pp. 45-52.
- (11) K. Tanaka , H. Aoyama and N. Takeda , "Nondestructive Observation Technology for Alumina-Fiber Reinforced Plastics", Proc. 10th Int. Symp. Nondestructive Characterization of Materials, Iketani Science and Technology Foundation, June 26-30, 2000, Karuizawa, pp. 75-84.
- (12)青山 博,田中行平,武田展雄,"光透過,AE,光ファイバセンサによるアルミナ

FRPの損傷検出",第44回日本学術会議材料研究連合講演会,日本材料学会,2000年9月,京都.

- (13) H. Aoyama, K. Tanaka, Y. Watanabe and N. Takeda, "Health Monitoring Technologies for Alumina-fiber-reinforced Plastics", ASME 2000 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Nov., 2000, Orlando, FL.
- (14) 青山 博,田中行平,武田展雄,"透過光を利用したアルミナ FRP 構造物の損傷検出 法",第2回「知的材料・構造システム」シンポジウム講演集,(財)次世代金属・複合 材料研究開発協会,2000年12月5-6日,pp.43-46.
- (15)田中行平,青山 博,武田展雄, "光透過を利用したパッチ型センサによる損傷検出",第 30 回 FRP シンポジウム,2001 年 3 月 14-16 日,京都.
- 2.2 文献
- (1) 青山 博,渡邊 洋之,武田 展雄,"透過光,反射光を利用した複合材料の非破壊検査
 ",日本機械学会論文集(A編),66巻 648号,2000.
- (2) 青山 博, 渡邊 洋之, 武田 展雄, "透過光を利用したアルミナ FRP のヘルスモニタ リング", 日本機械学会論文集(A編),66巻650号,2000.
- (3) H. Aoyama, K. Tanaka, Y. Watanabe and N. Takeda, "Health-Monitoring Technologies for Alumina-Fiber-Reinforced Plastics", Composite Structures, 2001, in press.
- (4) H. Aoyama, K. Tanaka, and N. Takeda, "Damage Growth Monitoring of Alumina FRP Using Transmitted Light", Materials Science Research International, 2001, in press.
- (5) H. Aoyama, K. Tanaka, and N. Takeda, "Health Monitoring Technology for Alumina FRP Using Transmitted Light", Materials Science Research International, 2001, in press.
- 2.3 特許等
- (1) 特願 2000-334643「光ファイバコネクタおよび複合材料構造」, 2000 年 11 月 1 日 出願(三菱電機).
- 2.4 その他の公表(プレス発表等) とくになし。

第Ⅱ章

スマートマニュファクチャリング 技術の開発

1 研究開発の成果と達成状況	65
	00
1.1 研究開発の成果	65
要 約	65
1.1.1 スマートマニュファクチャリング・グループ全体	67
1.1.2 母構造とセンサ・アクチュエータの一体化後術	71
1.1.3 センシング技術の確立	75
1.1.4 知的成形プロセス技術	82
1.2 達成状況	9 8
1.3 結論	99
 研究発表・講演、文献、特許等の状況 	101
2.1 研究発表・講演	101
2.2 文献	102
2.3 特許等	102
2.4 その他の公表(プレス発表等)	102

1. 研究開発の成果と達成状況

1.1 研究開発の成果

要 約

本研究の研究内容は、(1)知的成形プロセス技術と、(2)母構造とセンサ・アクチュエータ 等の一体化技術に分けられる。以下、この2項目について本年度の研究成果を述べる。

(1)知的成形プロセス技術

(a) センシング技術の開発

本研究では、成形過程における成形品の内部状態を検出するセンサとして、光ファイバセンサ、圧電セラミックスセンサ、フローフロント・硬化状態検出多機能センサ、誘電率センサの4種類を採用している。本年度は、光ファイバセンサについては、センシング部の剛性が異なるセンサによるひずみ測定の検討結果から、成形の冷却過程における熱収縮ひずみのみならず、硬化過程における硬化収縮ひずみも測定できることを明らかにし、光ファイバセンサ単独で硬化度の検出も可能であることがわかった。圧電セラミックスセンサおよびフローフロント・硬化状態検出多機能センサについては、積層構成の影響の解明、炭素繊維強化成形品への適用など実用化に向けて検討を行った。さらに、誘電率センサについては、熱可塑性樹脂の溶融粘度変化を検出することが可能であることを明らかにし、熱可塑性樹脂をマトリックスとするFRTPのプレス成形のスマート化におけるセンサとして使用できることがわかった。以上の成果から、各センサが2つの物理量を検出できること、あるいはアクチュエータ機能を有するなど、2種類の機能を発揮することがわかった。このセンサの多機能化は、センサを成形品に埋め込む必要があるスマートマニュファクチャリング技術にとって、少ないセンサの埋め込みで多くの内部状態を検出できる点から重要であると考えられる。

(b) モデリング技術および統合化プロセスシステムの開発

オートクレーブ成形について、本年度は、厚板を成形する場合に問題となる過昇温を回避 することを目標として、成形温度に着目したスマートマニュファクチャリングシステムを構 築した。構築したシステムは、内部温度のモニタリングと H11 年度に検討したマトリックス 樹脂の熱化学モデルによる温度予測に基づき、過昇温を回避するようにオートクレーブの昇 温速度をコントロールするように構成されている。実際に 88 層の CFRP 積層板について実証 実験を行い、システムの有用性を確認した。

RTM 成形については、デモンストレータを製作する上で、立体形状を有するプリフォーム の作製およびプリフォームへの樹脂の含浸状態のシミュレーションが必要である。本研究で は、立体形状を有するプリフォームの作製にはドレーピングを採用することとし、そのドレ ーピングによって発生する織物の繊維角の変化に対する樹脂の浸透係数の計測について検討 を行った。さらに、樹脂の金型への注入をコントロールすることが可能なスマート RTM 成形 機を製作した。

FRTP のプレス成形については、誘電率センサによる樹脂の溶融粘度変化のモニタリングに したがって、成形機の加圧制御を行い、プレス成形が可能な成形システムを作成した。そし て、実際に、CF/PEEK 積層板について、ボイドなどの欠陥がない、良好な積層板を成形でき ることを実証した。

(2) 母構造とセンサ・アクチュエータ等の一体化技術

H11 年度には、EFPI 光ファイバセンサについて成形圧力によりセンシング部に加わる圧縮 およびせん断力の測定への影響を検討した。本年度はさらに、曲げ負荷の影響について検討 した。その結果、センサへの負荷とひずみ出力の関係を定量的に求めることができた。セン サ・アクチュエータ埋め込みによる母構造への影響については、本研究では、主に、センサ を埋め込んだ FRP のセンサ部分における破壊過程のその場観察を行って検討することにした。 そこで、まず、その場観察が可能な小型負荷試験機を設計し、その組立て調整を行った。そ して、その場観察用の試験片についても検討し、実験システムを完成した。

-Abstract-

The present research project has two major subjects: (1) Smart processing technology and (2) Embedding technique of sensors and/or actuators into the host materials/structures. The followings are main achievements on these two subjects.

(1) Smart processing technology

(a) Development of sensing techniques

We employ the optical fiber sensor, piezo-electric ceramics sensor, multi-functional (resin flow front detection and degree of cure monitoring) sensor and dielectric sensor as the internal state monitoring sensors of the composite materials in processing. For the optical fiber sensor, we have shown that it can measure the curing contraction as well as the thermal contraction using the measured strain data of two types of sensors in which the rigidities at sensing part are different. Then the optical fiber sensor itself can monitor the degree of cure of the resin. On piezo-electric and multi-functional sensors, we investigated the effects of layup configuration and development of improved sensor for CF preform. On the dielectric sensor, we have shown that it can detect the melt viscosity of thermoplastic resins, and then it can be used for sensor in smart FRTP press forming.

The above achievements suggest that each sensor has the sensing ability of two physical quantities. This multi-functionality of sensors are very important for smart manufacturing technology since it guarantees the possibility of internal state monitoring using small numbers of sensors.

(b)Development of Modeling Technique and Unified Processing System

A smart manufacturing system was constructed respecting the processing temperature with the purpose to avoid the too high temperature in thick composite manufacturing in autoclave. The autoclave temperature was controlled to avoid too high material temperature based on the monitored temperature data and the thermo-chemical prediction which was obtained last year. The 88 prepreg were stacked and actually autoclave molded and the system ability was confirmed.

The smart RTM technique is being applied to the development of the demonstrator in which 3-dimensional preform and simulation of impregnation of the resin are necessary. For making the 3-dim preform, we employ the draping technique in which the angle of fiber bundles in cloth changes. We investigated the method of the permeability measurement in such non-orthogonal cloths for preforms. A smart RTM machine was also developed in which the resin quantity and velocity into the mold can be controlled.

On the press forming of FRTP, a processing system was developed in which the pressure can be

controlled based on the monitored data of the melt viscosity using the dielectric sensor. We actually obtained FRTP laminates without voids using this processing system.

(2) Embedding technique of sensors and/or actuators into the host materials/structures

The effects of compression and shear forces applied to the sensing part of the optical fiber sensor were investigated last fiscal year. Then this year was devoted to the investigation of the effects of bending of the sensing part. We obtained the quantitative relationship between the loads to the sensor and the strain output.

On the effects of embedding of sensor/actuator into the host materials, we conduct in-situ observations of the failure process of FRP near the sensor. For this purpose, we made a small loading apparatus in which in-situ observations are possible. The test specimen is also devised, then the experimental system was constructed.

1.1.1 スマートマニュファクチャリング・グループ全体

(1) 研究開発の目的

大型化、複雑化が進む機械・構造システムの省資源、省エネルギー化を実現するために は、複合材料/構造物にセンサ、アクチュエータを一体化して、そのスマート化を行うこと が有効であると考えられる。複合材料/構造物のスマート化により、材料や構造の信頼性お よび安定性を向上させ、部材厚の低減、維持管理に要する作業量・頻度の軽減等が可能と なり、材料や構造物の軽量化、長寿命化が実現される。

そこで、本研究開発は複合材料/構造物のスマート化を実現する上での基本技術となる、 スマートマニュファクチャリング技術を開発することを目的とするものである。

(2) 全体計画における 12 年度の位置付け

H12 年度の位置付けを(i)知的成形プロセス技術と、(ii)母構造とセンサ・アクチュエー 夕等の一体化技術に分けて、H11年度までの成果を踏まえて以下に述べる。

i)知的成形プロセス技術

a) センシング技術の開発

H11年度はオートクレーブ成形用にマトリックス樹脂の硬化状態を圧電セラミックスセンサにより検出できるセンシング方法を新しく開発した。この結果、アクチュエータとして埋め込んだ圧電セラミックスを使って、マトリックス樹脂の硬化状態をモニタリングできることがわかった。このセンシング方法を実用化するためには、センサの埋め込み方向、積層構成の測定への影響などを明らかにしておくことは不可欠である。そこで、本年度は埋め込み方向が強化繊維方向および直交方向の場合について検討した。また、積層数の影響についても検討した。光ファイバセンサについては、H11年度までに強化繊維に対して0°,45°,60°,90°の方向に埋め込んで、内部ひずみ測定を行い、内部ひずみ測定の可能性を示した。しかし、光ファイバセンサによる測定値の精度を、検証することができなかった。センシング技術を確立する上では、測定精度の検証は不可欠である。そこで、H12年度は、センサによる測定値を検証するため、センサを埋め込んだ積層板について、電気抵抗式ひずみゲージを貼付して熱ひずみを2種類のセンサで測定し、光ファイバセンサの出力値の精度を検討した。また、H11年度には、光ファイバセンサは成形の冷却過程にお

。方し信剣アルとう出剣の小変割봚蝸帑の間樹スセッリイマるようせく士率雷 瑟 (Tripeer のプレンス成形が変更ななことなって、本年度は、Gripeer について、 瑟 せくサ率電熱、おい的用実。オリ示きらこるきで出始き小変更挑幅密の間樹スででしま るわきコン野脳決放スレての放留散くしりロてリホ\継羅スそれコン要年11月、おすいとコとく のサイサアノと策死秤の予約更辛 III、アニチ。たこあな腿間でいらるが不然更感気順の 奥小野ひよは、賊間どいろはのるを逆一位インロマーロての計園るけ流き側せくナでん丼 この単語の雑類的のシートを使用する必要があった。しかし、センサと強化繊維の間に るもでせくせ率電話るする動電性しとい的本基やせくせ脂肪を、したし。 たし示きとこ るちシ宝郎を裏小野の諸樹入せでリイケびよな出鉄のインロビーロての沸焼 MTA、プロな た。フローフロント・硬化水能検出多機能センサじていては、おフレーフロー、た し信執アいてJ1気順の4节U諦加小動、い行き宝順フサさ小変き計順のせくすお恵辛 2IH 、すみを感度よく測定するためには、センサの剛性等について検討する必要がある。そこで、 の識界小野、さなとこうで近い前の胡下宗小野な率やくケアし小野い常次さな激歩い沙な し示きらこるきで 近順 き み ず 心 離 小 動 る け き ご 野 が か ま き む 本 の み 节 び 諦 加 焼 る け

発用のムモスシスロで出合語びよな術技でしてナートの開発 焼のた実転売気が動了いこびでしておい実手 [1] 、おていこい活動で一レセイート

ステムの構築およびその有効性の実証を行った。 (11) 母構造とセンサ・アクチェエモチので・せくす当時得()

よよ縦泊るは前ご席でくぐくケのせくサバトマて光ひよご零仕田浜病, ごでま恵辛 IIH 発関のけ出みずひのさんせくせら街負, ブいこご響湯をお友へ宏順みずびの荷負潤んせび イントーチや曲丁しと荷負るは成りよび等け田浜病, 比恵辛本。うしごれらら限ご的量宝き 世のやーエエモモウア・せくサ。うしば執了いてご響湯の防負や曲, さんらこるれらえ巻き 層動 970 多スクッミそ子審団, ごでま敳辛 IIH, おブいこご響湯のへ当群母るよごみ込め

く汛カスリアるよい範疇田師、>>ご基パセくリモニチの更挑蟜容るよりせく生率重続、お

板に埋め込んだ場合の圧縮強度、せん断強度への影響について検討した。その結果、埋め 込みによる強度低下はみられなかった。しかし、センサ・アクチュエータの埋め込みによ る母構造への影響を、このように個別に試験片を作製して測定していたのでは、その組合 せが非常に多いため、限られた時間では有意義な結論を得ることはできない。そこで、本 年度は本プロジェクトの期間内に母構造への影響について、有効な結論を得ることができ る実験方法について検討し、その準備を行った。

(3) 12年度研究成果のまとめ

本年度の研究成果を(1)知的成形プロセス技術と、(2)母構造とセンサ・アクチュエータ 等の一体化技術に分けて述べる。

i)知的成形プロセス技術

a) センシング技術の開発

本研究では、成形過程における成形品の内部状態を検出するセンサとして、光ファイバ センサ、圧電セラミックスセンサ、フローフロント・硬化状態検出多機能センサ、誘電率セ ンサの4種類を採用している。以下、各センサ毎に本年度の成果を述べる。

①光ファイバセンサ

本年度は、センシング部の剛性が異な EFPI 光ファイバセンサを一方向強化 GFRP 積層板 に埋め込み、成形過程における内部ひずみ測定を行った。その結果、成形過程の昇温後の 温度一定領域においても 2 種類のセンサが圧縮ひずみを検出したことから、硬化収縮ひず みを検出できることがわかった。また、剛性の低いセンサの方が大きなひずみ値を検出し たことから、硬化収縮の検出には剛性の低いセンサを使用する必要があることがわかった。 したがって、光ファイバセンサにより成形の冷却過程における熱収縮ひずみのみならず、 硬化過程における硬化収縮ひずみも測定できることがわかり、光ファイバセンサ単独で硬 化度の検出も可能であることが明らかになった。さらに、以上の EFPI 光ファイバセンサの 成果に加えて、FBG 光ファイバセンサを使った RTM 成形過程における内部ひずみ測定につ いても検討した。その結果、FBG センサにより内部ひずみ測定が可能であることがわかっ た。

②圧電セラミックスセンサ

H11年度は、測定方向が0°になるようにセンサを埋め込み測定実験を行った。本年度は 埋め込み方向の測定への影響を調べるため、センシング方向が0°、90°方向になるよう に埋め込んだセンサを使って測定を行った。その結果、2種類のセンサで成形の冷却過程 までの出力結果がほぼ等しいことがわかり、埋め込み方向の影響がほとんどないことがわ かった。ただし、冷却過程においては、2種類のセンサで測定値がかなり異なっており、 埋め込み方向による測定値への影響は大きいことも明らかになった。次に、センサを埋め 込む積層板の積層数が異なる場合について、硬化度の測定を行った。その結果、冷却過程 が始まるまでは、積層数による測定への影響はほとんどないことがわかった。しかし、こ の場合も、冷却過程においては、その影響が大きいこともわかった。以上の結果より、成 形条件を最適化する上では冷却過程が始まるまでの硬化度の検出が重要であることから、 埋め込み方向および積層数の影響については、圧電セラミックスセンサの測定に影響がな いことがわかった。 ③フローフロント・硬化状態検出多機能センサ

本年度は、センサの表面に絶縁用のコートを直接施し、炭素繊維との接触による問題を 解決して、従来 CFRP に適用できなかった点を改良した。まず、コート材としてシリコンお よびエポキシ樹脂を採用し、それぞれを電極の表面にコートしたセンサを作製し、RTM の フローフロント検出実験を行った。その結果、シリコン・コートを施したセンサはフローフ ロント位置に対する誘電率の線形性が悪く、また、測定感度も少し低くなるのに対して、 エポキシ・コートはセンサの機能を大きく低下させることなく、センサの絶縁性を付与する ことが可能であることがわかった。

④誘電率センサ

H11年度にガラス繊維/ポリプロピレン積層板のプレス成形過程におけるマトリックス樹 脂の溶融粘度変化を検出できることを示した。本年度は、CF/PEEK について誘電率センサ を使用した溶融粘度変化のモニタリングによる最適成形を行うため、PEEK 樹脂単体のプレ ス成形過程における誘電係数変化と、物理的な溶融粘度や体積変化との関係を求めた。

以上の成果から、各センサが2つの物理量を検出できること、あるいはアクチュエータ 機能を有するなど、2種類の機能を発揮することがわかった。このセンサの多機能化は、 センサを成形品に埋め込む必要があるスマートマニュファクチャリング技術にとって、少 ないセンサの埋め込みで多くの内部状態を検出できる点から重要であると考えられる。

b) モデリング技術および統合化プロセスシステムの開発

①オートクレーブ成形

本年度は、厚板を成形する場合に問題となる過昇温を回避することを目標として、成形 温度に着目したスマートマニュファクチャリング・システムを構築した。構築したシステム は、内部温度のモニタリングと H11 年度に検討したマトリックス樹脂の熱化学モデルによ る温度予測に基づき、過昇温を回避するようにオートクレーブの昇温速度をコントロール するように構成されている。実際に、このシステムを使って、タフエポキシ樹脂系プリプ レグ 88 層の厚肉平板(約 12mm)の成形実験を行った。その結果、システムの制御により過 昇温は約 4℃となり、設定された許容値よりはやや大きいものの、制御なしの場合と比べ て 1/4以下に抑えることができ、本システムの有用性を確認することができた。

②RTM 成形

本年度は、デモンストレータの開発に向けて、立体形状を有するプリフォームの作製お よびプリフォームへの樹脂の含浸状態のシミュレーションについて検討した。立体形状を 有するプリフォームの作製にはドレーピングを採用することにした。そして、ドレーピン グによって発生する織物の繊維角が変化する場合について、樹脂の浸透係数を計測した。 さらに、樹脂の金型への注入をコントロールすることが可能なスマート RTM 成形機を製作 した。この成形機は、樹脂を加圧するための 4 系統の圧縮空気配管に電磁式開閉弁と自動 圧調整弁が取り付けられており、パーソナルコンピュータからの信号によって制御できる 構成となっている。

③精密プレス成形

FRTPの精密プレス成形については、誘電率センサによる樹脂の溶融粘度変化のモニタリ ングにしたがって、成形機の加圧制御を行い、成形が可能なシステムを作製した。本研究 の制御方法では、加熱段階初期において、樹脂がまだ溶融していない時点では加圧力を小 さくしておき、プリプレグの樹脂の溶融がセンサによって検出されたところで加圧力を上 げて、材料を製品形状とする。さらに、樹脂の固化がセンサによってモニタされたところ でプレスによる加圧力を上げて、樹脂の収縮によるボイド等の成形不良の発生を防ぐ、と いうものである。実際に、CF/PEEK 積層板についてこのシステムを使った成形実験を行い、 ボイドなどの欠陥がない、良好な積層板を成形できることを示した。

ii) 母構造とセンサ・アクチュエータ等の一体化技術

III 年度には、成形圧力により EFPI 光ファイバセンサのセンシング部に加わる圧縮およ びせん断力による測定への影響を検討した。本年度はさらに、曲げ負荷の影響について検 討した。実験では、センサのセンシング部の直径が約 310 µm と極めて小さく、センシング 部への直接の負荷は困難であるため、GFRP 積層板の中央に光ファイバセンサを埋め込んだ 平板試験片を製作して 3 点曲げ試験を行った。その結果、センサへの負荷とひずみ出力の 関係を定量的に求めることができた。センサ・アクチュエータ埋め込みによる母構造への 影響については、本研究では、主に、センサを埋め込んだ FRP のセンサ部分における破壊 過程のその場観察を行って検討することにした。そこで、まず、その場観察が可能な小型 負荷試験機を設計・製作し、その組立て調整を行った。そして、その場観察用の試験片につ いても検討し、実験システムを完成した。

1.1.2 母構造とセンサ・アクチュエータの一体化技術

(1) EFPI 光ファイバセンサに及ぼす成形圧力の影響

センサ・アクチュエータの複合材料への一体化においては、埋め込まれたセンサ・ア クチュエータがその機能を十分発揮することが不可欠である。特に、オートクレーブ成 形においては積層されたプリプレグに成形圧力が加わるため、その測定結果への影響を 明らかにしておく必要がある。そこで、平成11年度は、内部ひずみをモニタリングする ための EFPI 光ファイバセンサについて、成形圧力等によってセンサのセンシング部に加 わる圧縮およびせん断力のひずみ測定結果への影響について検討した。本年度は、曲げ モーメントの影響について検討した。センサのセンシング部の直径が約310 μm と極めて 小さく、センシング部への直接の負荷は困難であるため、図1.1.2-1に示すような GFRP 積層板の中央に光ファイバセンサを埋め込んだ平板試験片を製作して3点曲げ試験を行 った。実験においては試験片に加えた荷重とセンサからの出力の関係を測定した。曲げ

試験の結果を図 1.1.2-2 に示す。 図の負荷開始点における 760μの 圧縮ひずみは、成形過程で GFRP 積 層板内部に発生した圧縮残留ひず みである。センサからのひずみ出 力においては、負荷の増加に伴い にぼ線形的に圧縮ひずみが増加し ている。しかし、光ファイバセン サは試験片の中央面に埋め込まれ ているので、センサのひずみ出力 はほぼ0となるはずである。した





果諸祎稱 MET と果諸宝順もでもの 2-2.1.1 図



図 1.1.2-3 従来の圧電セラミクス素子とフラットリード線を用いた圧電セラミクスの比較





(3) デモンストレータ用光ファイバ信号線取出技術

デモンストレータ供試体の外板パネルのオートクレーブ成形において、成形時の内部 歪をモニタリングするためには、オートクレーブ内の供試体に一端を埋め込んだ光ファ イバセンサの他端を、オートクレーブの外に取出した状態で成形する必要がある。この 際、オートクレーブからの光ファイバの取出口(ポート)は、加圧されたオートクレー ブからのリークを防ぐと同時に、光ファイバに損傷を与えない構造でなければならない。 大阪市立大学のオートクレーブには上記の条件を満たす取出口が装備されており、オー トクレーブを 7kg/cm² (0.69MPa) に加圧した状態で光ファイバによる内部歪のセンシン

グが可能であるが、デモンスト レータ供試体において成形モ ニタリングを行うパネルを成 形するオートクレーブ(三菱重 工業(株)保有)はより大型のも ので、既存の開口部(現状はメ クラ蓋)を流用することから、 作業性向上を目的とした改良 を実施した。大阪市立大学の取 出口の構造を図 1.1.2-5(a) に 示す。この構造を基に、いくつ かの取出口を試作・検討した結 果、図 1.1.2-5(b)の構造が作 業性が良好で、かつ大阪市立大 学の取出口と同等の性能を有 していたことから、これをデモ ンストレータ供試体の成形時 のモニタリングにおける光フ ァイバ取出口として採用する こととした。

このデモンストレータ用取 出口は、大阪市立大学の取出口 と基本的に同等の構造となっ ており、図 1.1.2-5 に示す下側





ポート治具をオートクレーブ側ポートにねじ込んだ状態で使用する。金属プレート及び シリコンゴム栓のスリット部以外の治具開口部は、光ファイバセンサの端部のコネクタ が通るサイズとなっており、オートクレーブ内部よりコネクタの付いた光ファイバの一 端をこれら開口部を通して外に出し、金属プレート及びシリコンゴム栓のスリットに光 ファイバを挟んだ後、押え治具を装着する。シリコンゴム栓には必要に応じて真空用グ リース等を塗布する。

デモンストレータ用取出口では、下側ポート治具内部のテーパを大きくしてシリコン ゴム栓の位置決めをしやすくすることで金属プレートを1枚減らすとともに、上側押え 治具の固定をボルトに代えてねじ込みとすることで、作業性の向上を図った。この部分 をねじ込みとすることで、金属プレート及びシリコンゴム栓が追随して回転し、光ファ イバをねじるような力を加えることが懸念されたが、実際に装着した結果、そのような 問題はなく、光ファイバに損傷を与えないことを確認した。

(4) 母構造への健全性評価方法について

母構造とセンサ・アクチュエータの一体化技術を確立するためには、センサの機能を 十分に発揮するための一体化技術を確立すると同時に、センサ・アクチュエータを埋め 込むことによる母構造への強度低下などの力学的影響について明らかにし、母構造の健 全性を保証する必要がある。そこで、H11年度においては CFRP 積層板にピエゾセラミッ クを埋め込み、せん断、圧縮強度を測定した。その結果、ピエゾセラミックを埋め込ま ない場合に比べて、有意な影響はみられなかった。しかし、このように単純にセンサ・ アクチュエータを埋め込んだ試験片について、静的および疲労試験を行っていたのでは、 膨大な時間が必要であり本研究の限られた時間では極めて不充分なデータしか得ること ができず、信頼性のある結論を得ることができない。そこで、本研究ではセンサ・アク チュエータを埋め込んだ試験片について負荷試験を行い、センサ・アクチュエータ部分 の破壊過程をその場観察により明らかにし、センサ・アクチュエータの埋め込みによる 試験片の強度への影響を検討していくことにした。そのため、まず、負荷過程において 試験片の破壊過程が観測できる試験装置を設計、製作した。図 1.1.2-6 は、センサ・ア クチュエータを埋め込んだ試験片の埋め込み部を観察しながら負荷試験が行える、小型 の負荷試験機の概略図である。この図は試験機を上から見た図であり、負荷過程におい て FRP 試験片の側面を光学顕微鏡およびレーザーひずみ測定装置で観察、測定ができる ように設計されている。実験では、まず、破壊過程を光学顕微鏡により観察して各負荷 レベルにおける破壊過程を明らかにする。次に、レーザーひずみ測定装置を使って、破 壊過程におけるセンサ・アクチュエータ埋め込み部のひずみ分布を測定し、定量的に埋 め込みによる影響を明らかにしていく。



図 1.1.2-6 破壊過程のその場観察用負荷試験機

1.1.3 センシング技術の確立

(1) 成形過程における内部状態センシング用センサ

本研究では、内部状態センシング用センサとして、光ファイバセンサ、フローフロント・硬化状態検出多機能センサ、圧電セラミックスセンサおよび誘電率センサを採用している。センサ埋め込みによる母構造への影響を考えたとき、1 種類のセンサで多くの物理量を検出することが望ましい。本年度においては、光ファイバセンサにより FRP 積層板の硬化収縮ひずみを測定することが可能であることが明らかになったため、硬化収縮ひずみから実用的に硬化状態を検出できることがわかった。また、H11 年度においてア

表 1.1.3-1 各種センサと測定対象

センサ	測定対象
光ファイバセンサ	熱収縮ひずみ 硬化収縮ひずみ (マトリックス樹脂の硬化度)
フローフロント・硬化状態検出 多機能センサ	フローフロント マトリックス樹脂の硬化度
圧電セラミックスセンサ	マトリックス樹脂の硬化度 アクチュエータ機能
誘電率センサ	マトリックス樹脂の硬化度

として有用な成果が得られたものと考えられる。本年度までに得られた各センサと測定 可能な物理量との関係を表 1.1.3-1 に示す。

(2) 成形過程における内部状態センシング

- i) オートクレーブ成形
 - a) 硬化収縮ひずみの測定

H11 年度までは光ファイバ センサのセンシング部の直径 が310μmのものを使用してい た。センシング部の構造から センシング部の直径が小さく なるとセンシング部の剛性が 小さくなり、ひずみ測定感度 が高くなると予想された。そ こで、本年度はセンシング部 の直径が200μmのセンサを用 意し、直径の異なる 2 種類の センサをGFRP 積層板に埋め込 み、成形過程における内部ひ



ずみ測定を行った。その結果を図 1.1.3-1 に示す。図より、成形開始後約 140 分以降、 直径 200μmの光ファイバセンサが引張ひずみを、その後圧縮ひずみを検出し、冷却過 程において内部温度に対応して圧縮ひずみを検出していることがわかる。この冷却過 程以前のひずみ出力を詳細に調べるため、図の縦軸のひずみスケールを±200μに設定 して、イオン粘度も同時にプロットした結果を図 1.1.3-2 に示す。センサが圧縮ひず みから引張ひずみを検出するようになるのは、イオン粘度測定結果との関係から、マ トリックス樹脂の硬化が進みセンサを変形させることができるほど粘度が高くなり、 結果としてセンサがオートクレーブ内の温度上昇に対応した熱膨張を引張ひずみとし て測定できるようになったためであると考えられる。そして、直径 200μmのセンサの 方が 310μmのセンサより大きな引張ひずみを測定しているのは、センシング部の剛性

が小さ 積層板に埋め込み、成形過程におけ 電率センサにより測定された いためであると考えられる。 張による変形に対してひずみやす 果より、光ファイバセンサを GFRP ていることを示している。以上の結 と対応しており、硬化がまだ進展し ン粘度が徐々に増加していること 果と考えられる。この測定結果は誘 クス樹脂の硬化収縮を検出した結 みが測定されているのは、マトリッ 温度が--定になった後に圧縮ひず く、マトリックス樹脂の熱膨 また 1 4



ずみを検出でき、硬化進展の様子を知ることが可能であることがわかった。 る内部ひずみを測定すれば、ある程度硬化が進んだ段階から、 硬化収縮による圧縮ひ

b)熱収縮ひずみの測定

が小さくなるほどひずみ測定値も小さくなり、光ファイバセンサによる正確な熱収縮 繊維に対して直行する方向に埋め込んだセンサからの出力が最も大きく、 縮ひずみの測定について検討してきた。 H11 年度までに GFRP 積層板に光ファイバセンサを埋め込み、冷却過程における熱収 その結果、 一方向強化積層板において、 埋め込み角 強化

おける光ファイバセンサから 結果、破線は成形の冷却過程に 冷却時のひずみゲ を示す。実線は恒温曹における 温度、縦軸は測定されたひずみ 形温度あるいは恒温曹内部の 測定を行った。測定結果を図 ひずみゲージと略す)を貼付し 電気抵抗式ひずみゲージ(以下 GFRP 積層板について、 行なうことができなかったの ができた。しかし、測定された ひずみの測定可能を示すこと 1.1.3-3に示す。図の横軸は成 て、恒温曹を使用した熱ひずみ る内部ひずみ測定を行った を埋め込んで成形過程におけ で、本年度は光ファイバセンサ 値の他の測定法による検証を ージの測定 表面に



図 1- 1- 3-3 恒温曹におけるひすみゲージ測定結果と オートクレーブ成形における光ファイバセンサ (EFDI) によるひずみ測定結果
H 品に埋め込む場合は、特にセンシング部にボイドが発生しないように注意する必要が が伝達されなかったためであると考えられる。 シング部に発生したボイドが原因となりセンサのセンシング部を収縮させるほどのカ なけ にボイドが発生していることがわかった。この結果から、約 100℃以下の温度におい だセンサの 100℃以下の測定結果を検討するため、センサ埋め込み部の埋め込み状態 果がひずみゲージの測定により検証されたことがわかる。 わかる。この結果より、成形過程における光ファイバセンサにより内部ひずみ測定結 の測定値を除けば、2 種類のセンサによるひずみ測定結果はほぼ一致していることが 較・検討する必要がある。図より、90°に埋め込んだ光ファイバセンサの約 100℃以下 2 種類のセンサによるひずみ測定結果は、温度に対するひずみ曲線の傾きについて比 生した GFRP 積層板の残留ひずみである。ひずみゲージは成形後に積層板の表面に貼付 のひずみ出力を示す。40℃における光ファイバセンサの圧縮ひずみは、 を調べた。 \subset ることがあらためて確認された。 ているため、室温より高い40℃においては引張ひずみを検出している。したがっ マトリックス樹脂の熱収縮によるひずみが他の角度に対して大きいため、 センサ埋め込み部の断面を光学顕微鏡により観察した結果、センシング部 したがって、光ファイバセンサを成形 なお、90°方向に埋め込ん 成形によ さく 近発 Ņ

c) マトリックス樹脂の硬化度の測定

層板について、硬化度の測定を行 ンサを埋め込む積層板の積層数の影響についても調べるため、 方向になるように埋め込み、測定を行った。その結果を図 1.1.3-4 に示す。 本年度は埋め込み方向の測定への影響を調べるため、センサのセンシング方向が 90。 シング方向が強化繊維方向になるようにセンサを埋め込んで測定を行った。そこで、 マトリックス樹脂の硬化度を測定できることがわかった。H11 年度は、センサのセン H11 年度において、圧電セラミックスセンサにより成形過程における GFRP 積層板の 10 層および 20 層の積 また、セ

測定結果を比較すると、こ 定値への影響が大きい。次に、図 類のセンサで測定値がかなり異な サで多少の違いはあるものの、出 結果を比較すると、 み方向が 0°と す。図 1.1.3-4 のセンサの埋め込 った。 の違いがあるものの大きな違いは も冷却過程が始まるまでは、 1.1.3-5 の積層数が異なる場合の っており、 ただし、冷却過程においては、2 種 カ結果はほぼ等しいことが分かる。 まる約220分までは、2種類のセン 図 1.1.3-5 に測定結果を示 埋め込み方向による測 $^{\circ}00$ 冷却過程が始 の場合の測定 この場合 余余





図 1.1.3-5 積層枚数の違いによる圧電セラミクス のインピーダンス変化の比較

ij

RTM 成形

a)

フローフロントの検出

化繊維の間に何らかのシートを挟む場合は、プルフォーム内を流れる樹脂のフローフ 接接触しないように、 面に絶縁用のコートを直接施す ロントとシートを挟んでセンサ側を流れる樹脂のフローフロントが一致するのかとい あるため、 う問題、および硬化度の測定感度が下がるという問題があった。そ フロント・硬化状態検出多機能センサは、基本的にくし型電極を有する誘電率センサで 本グループで開発したフロー 強化繊維に炭素繊維を使用した成形品については、センサと強化繊維が直 絶縁用のシートを使用する必要があった。しかし、センサと強 ことにより、 炭素繊維との接触による問題を解決する ù U センサの表

かる。 測定感度が低下することがわ 測定された誘電率を示し びエポキシ樹脂を採用し、それ Ц [る。図より、コートを施したた 図の横軸は樹脂のフロー たセンサを作製し、RTMのフロ ぞれを電極の表面に コー 方法を考案した。そこで、まず、 $\overline{}$ べて検出曲線の傾きが小さく、 ンサは、コートしない場合に比 ソト位置、縦軸はセンサにより その結果を図 1.1.3-6 に示す。 て比較すると、 フロント検出実験を行った。 を施したセンサの方がフ ト材としてシリコンおよ 2種類のコート材につい シリロン・ロー 412 テレ レロ



- 79 -

ーフロント位置に対する誘電率の線形性が悪く、また、曲線の傾きから測定感度も少 し低いことがわかる。これらの結果から、エポキシ・コートを採用すれば、センサの機 能を大きく低下させることなく、センサの絶縁性を付与できることがわかった。

b) 内部ひずみの測定

RTM 成形における内部ひずみ測定には、FBG 光ファイバセンサを使用した。実験に用 いた金型およびセンサの埋め込み位置を図 1.1.3-7 に示す。強化繊維としてはガラス クロスをマトリックス樹脂にはエポキシを使用した。FBG センサは樹脂の流動方向に 対して直交する方向に埋め込んでおり、誘電率および温度も同時に測定している。内 部ひずみは、樹脂を注入した後に金型を恒温曹に入れて、樹脂を硬化させる過程で測 定した。その結果を図 1.1.3-8 に示す。図には、成形品の内部温度も同時に示してい る。図より、2 回目の昇温過程でそれまでひずみを出力していなかったのに対して、 値は小さいものの圧縮ひずみを、その後内部温度に対応した引張ひずみを検出してい る。そして、温度変化と同様に一定のひずみを出力した後、冷却過程で熱収縮に伴う 圧縮ひずみを測定している。この結果から、RTM 成形のマトリックス樹脂注入後の硬 化過程における成形品の内部ひずみを FBG センサにより測定できることがわかった。



図 1.1.3-7 RTM 成形における内部ひずみ測定実験用金型



iii) プレス成形

熱可塑性 FRP や熱可塑性樹脂の成形過程のモニタに誘電率式センサを適用する方法 を検討するために、耐熱熱可塑性樹脂である PEEK (Poly-ether-ether-ketone) 樹脂単 体のプレス成形過程における誘電係数変化と、同樹脂の物理的な溶融粘度や体積変化 との関係について検討を行なった。

図 1.1.3-9 に試験に用いたプレス金型の構造と金型への材料のセット方法を示す。 金型は 150mm × 150mm × 2mmのキャビティを持ち、底面には直径 12mmの誘電率式セ ンサ(くし型電極)を設置し、6 本のヒータによって加熱を行なった。電極上には、 樹脂試料の電極への付着と、後述の CFRP 成形試験時の電気的な短絡を防ぐために、厚 さ 40 μmのポリイミド樹脂フィルムを敷いた。PEEK 樹脂の試料には厚さ 0.3mmの同樹

脂のフィルムを重ねたもの を使用した。PEEK 樹脂をセッ トした金型を加熱するとと もに、ホットプレスによって 加圧してプレス成形を行な い、成形中の誘電係数の変化 を測定した。加熱速度は 2℃ /min、最高温度は 380℃(30 分保持)、冷却速度は 2.6℃ /min、プレスによる加圧力は 0.22MPa の一定である。誘電 係数の測定は、加熱中と最高 温度では1分毎、冷却中は 20



図 1.1.3-9 プレス成形試験方法

秒毎にセンサに 0.5~5Hz の交流電圧をかけて、その応答を測定することから行った。

図 1.1.3-10 に PEEK 樹脂単体のプレス成形中の誘電損失係数(Loss Factor: 複素誘 電率の虚数成分)の測定結果を示す。Loss Factor は温度とともに上昇・降下し、温 度によって急増・急減する点が見られる。図 1.1.3-11 に冷却過程のうち 380~280℃ の温度域での同測定の結果と、動的粘弾性測定によって得られた PEEK 樹脂の溶融粘度

Conductivity は、 Loss Factor に真空中の誘電率 (8.854×10⁻¹² F/m) と交流 の角速度を掛けた数値であ る。Conductivityは315℃ (冷却速度 2℃/min) また は 305℃ (同 6℃/min) で急 激に減少し、これはそれぞ れの冷却速度で粘度が急激 に増加する温度とほぼ一致 している。この結果から、 熱可塑性樹脂において、樹 脂の固化にともなう粘度上昇 が誘電率式センサによってモ ニタできると考えられる。ま た、固化の開始温度は冷却速 度が大きくなると低温側に移 動するため、同じ温度であっ ても粘度が異なる状態が存在 しうるが、誘電率式センサに よって冷却速度による影響も モニタすることができること になる。

変化とを併せて示す。図中

0.5Hz e Log Loss Factor 300 7 005 7 005 7 005 1Hz 300 5H0 0 0 100 200 300 400 Time(min) 図 1.1.3-10 PEEK 樹脂プレス成形中の 誘電損失係数の変化 5 -7 Log(Conductivity(S/m)) 0 Log(Viscosity(Pa·s)) 4.5 d -8 4 3.5 Viscosity 6°C/min) ductivitv(2°C/min 3 -10lon ductivity(6°C/min) 280 300 320 340 360 380 Temperature (°C)

図 1.1.3-11 PEEK 樹脂冷却過程での

400

- Conductivity の変化と樹脂粘度との比較
- 1.1.4 知的成形プロセス技術

(1) モデリング技術の確立

i)オートクレーブ成形

熱硬化樹脂の硬化は通常発熱反応であり、オートクレーブ成形中の部材温度を上昇 させる。特に厚板 CFRP 部材を成形する場合、反応速度のピーク時における急激な発熱 により、CFRP 温度が設定値を大きく超えることも考えられる。H11 年度には、タフエ ポキシ樹脂系プリプレグ(三菱レイヨン製、MR50K/#982、一方向材)の擬似等方積層 平板において、88 層(約 12mm)の厚板成形時にみられる過昇温を Springer らの熱化 学モデル¹⁾に基いて予測し、実験値とよく一致する結果を得た。

また H11 年度までに、タフエポキシ樹脂系プリプレグ疑似等方積層平板に埋め込ん

だ EFPI 型光ファイバセンサによるオートクレーブ成形中の内部歪モニタリングを実施する一方、樹脂単体の硬化過程での比体積変化を測定して、これを温度と硬化度の 関数として定式化した。内部歪のモニタリング結果と比体積変化とを比較した結果、 両者の間に一致した傾向がみられ、内部歪の測定値が成形過程の樹脂の硬化収縮及び 熱収縮に対応していることを確認した。

これらの結果に基き、種々の硬化サイクルにおける部材温度及び樹脂比体積の変化 を予測することが可能である。88 層の厚板成形時において、昇温速度が 2℃/分及び 0. 2℃/分のケースについて、CFRP 温度を予測した結果を図 1. 1. 4-1 に、樹脂の比体積 変化を予測した結果を図 1. 1. 4-2 に示す。

昇温速度が 2℃/分の場合、昇温の完了とほぼ同時に反応速度がピークとなる結果、 CFRP 温度は設定された保持温度に対し 20℃近い過昇温を示す。一方、昇温速度を 0. 2℃ /分とした場合、昇温完了よりも早く(温度の低いうちに)反応速度がピークに達する 結果、CFRP 温度は設定された保持温度を超えないことがわかる。

また比体積変化についても、昇温速度を小さくすることにより硬化収縮量を抑えら れることがわかる。これは小さい昇温速度で時間をかけて昇温すると、温度が比較的 低い時点で硬化が始まるため、樹脂の熱膨張が小さいうちに硬化収縮が始まることに









なり、結果として比体積のピークが低くなることによる。即ち、CFRP ピーク温度(過 昇温)及び樹脂の硬化収縮量とも、昇温速度を小さく設定することで抑えることがで きる。

大きな過昇温は樹脂の物性に影響し、成形後の CFRP の強度を低下させる可能性があ る。過昇温が大きくなった場合の問題点を明らかにするため、同じ材料の 32 層の疑似 等方積層平板において、この樹脂の推奨される硬化温度が 183℃であるのに対し、ピ ーク時において 250℃となる極端な過昇温を模擬した供試体を作製し、通常の硬化サ イクルで成形したものと強度を比較した。

各供試体の成形条件を図 1.1.4-3 に、強度を評価した結果を表 1.1.4-1 に示す。過 昇温を模擬した供試体では圧縮強度と層間せん断強度が低下していることがわかる。 即ち、単位表面積あたりの反応熱が大きくなる厚板部材を成形する際には、昇温速度 を調整して過昇温を防ぐことにより、こうした強度低下を避ける必要がある。

(b) 過昇温を模擬

(ピーク温度:250℃)

樹脂の硬化収縮は、熱収縮とと もに CFRP の残留応力の原因とな る。カーボン繊維とマトリックス 樹脂との熱膨張差に起因する残留 応力は FEM 解析により評価できる が、これに硬化収縮を加えた解析 を試行した。具体的には、樹脂 の比体積変化に熱膨張/収縮と 硬化収縮が含まれていることか ら、熱膨張率の代わりに比体積 変化の予測結果から算出した膨 張(収縮)率を用いて解析すれ ばよい。

但し樹脂が流動性を有する間 は応力はほとんど加わらないと 考えられるので、樹脂がある程 度の硬化状態に達した時点から 解析を開始する必要がある。そ こでプリプレグの状態で粘弾性 測定を実施し、硬化度が 25~

	圧縮強度 [MPa]		弾性率 [GPa]		層間せん断強度 [MPa]	
		平均		平均		平均
(a) 通常の硬化サイクル (183℃硬化)	614	614	56.3	54.6	82.9	85.0
	580		53.3		81.8	
	595		54.3		90.3	

545

57.5

53.2

52.0

69 1

79.1

743

74.2

54.2

556

565

513

表 1.1.4-1 強度評価結果

	最大主応力 [Mpa]
2°C/分	87.5
0.2°C/分	40.6
2°C/分(123°Cまで) → 0.4°C/分(123°C~183°C)	61.0
熱収縮のみを考慮した場合(参考)	48.0
地 2℃/min 2℃/min 2℃/min 2℃/min 2℃/min 2℃/min 2℃/min 4℃ 2℃/min 4℃/min 400/min 40	-2℃/min <u>183℃ ×60</u> 分 -2℃/min 7.0 kg/c m
(空」 <u>FL力が1.4kg/c m到達後、真空を開放</u> <u>東空</u> 」 <u>FL力が1.4kg/c m到達後、真空を開放</u> <u>真空</u> 」 <u>FL力が1.4kg/c m到達後、真空を開放</u> <u>真空</u> 」 <u>「日</u> 力が1.4kg/c m到達後、真空を開放	60 ⁻ UU ト) (g/c mi到達後、真空を開放 0 ^o C) た 井井 将
通常の(183で)硬化サイクル (b) 適昇温(25	00)を模擬

30%に達した時点で、粘性が硬化前の常温での値の約 10 倍になることを確認した。また H10 年度に実施した誘電センサによるモニタリング結果からは、硬化度が 30~40% でイオン粘度が飽和している。以上のことから、硬化度が 40%に達した時点で樹脂は 完全に流動しなくなるものと仮定し、図 1.1.4-4 に示すカーボン繊維とマトリックス 樹脂から成るモデルを用いて、図 1.1.4-2 に示す 2 通りのケース(昇温速度が 2℃/分 及び 0.2℃/分)並びに途中で昇温速度をかえるケース(2℃/分→0.4d℃/分) について、硬化度が 40%に到達してから降温が完了するまでの比体積変化に基き、FEM 解析 を実施した。



図1.1.4-4 硬化収縮による残留応力解析用モデル

マトリックス樹脂はカーボン繊維に比べて収縮量が大きいため、マトリックス樹脂 に引張応力がかかる。この応力の解析結果を表 1. 1. 4-2 に示す。昇温速度を 0. 2℃/分 にすると 2℃/分のケースに比べて残留応力が 1/2 以下になっており、また 120℃~ 183℃の間のみ昇温速度を 0. 4℃/分に下げるだけでも応力を小さくする効果がみられ る。また熱収縮のみを考慮した場合の解析結果も表中に示す。昇温速度が 2℃/分のケ ースでは硬化収縮が熱収縮とほぼ同程度の寄与をしていることがわかる。なお、昇温 速度が 0. 2℃/分のケースで、熱収縮のみを考慮したケースよりも残留応力が小さいの は、183℃(保持温度)に達する前に硬化度が 40%に到達するため、183℃よりも低い 温度が解析の起点となっていることによる。

マトリックス樹脂に加わる残留応力は、樹脂に亀裂などの欠陥を発生させる要因に なると考えられる。昇温速度を調整することで、過昇温を防ぐだけでなく、こうした 欠陥の原因となるマトリックス樹脂の残留応力を小さくする効果があることがわかる。

ii) RTM 成形

a) プリフォームへの樹脂含浸特性

RTM (Resin Transfer Molding) 法を用いて複雑な形状の成形を行う場合、プリフォーム(繊維織物)への樹脂含浸時に樹脂の未含浸部ができやすい、という問題がある。 そこで、樹脂含浸挙動を数値シミュレーションによって事前に予測し、樹脂注入の条件を調整する方法が試みられている²⁾。一般に、このシミュレーションでは Darcy の 式による方法が用いられている。Darcy の式は以下のように表される。

 $u_i = k_{ii} / \mu \cdot (\partial p / \partial x_i)$

(1)

u_iは流体(樹脂)の浸透速度、μは流体の粘度、∂p/∂x_jは圧力勾配、k_{ij}はプリフォ ームへの樹脂の浸透しやすさを示す定数で、浸透係数(permeability)と呼ばれる。 浸透係数はプリフォームの種類や繊維含有率によって異なるので、シミュレーション を行なうためには、そのプリフォームについて予め浸透係数を測定しておく必要があ る。平成11年度の研究では、ガラス繊維織物の縦糸横糸方向の1次元(樹脂含浸方向 が一方向)の浸透係数を測定した。デモンストレータ「RTM 一体成形パネル」のプリ フォーム作製にドレーピング法(深絞り)の適用を検討していることから、平成12年 度の研究では、ドレーピング時に起こる、繊維織物の織目が変形した状態での浸透係 数の測定方法について検討した。

元々2次元の平面である繊維織物を用いて3次元形状のプリフォームをつくるため

には、①織物を切って展開図形状を作る、②ドレーピングする、の2つの方法が考え られるが、成形品の強度や剛性の点から、繊維を切ることなくプリフォームを作るこ とができるドレーピングが勝っている。しかしドレーピング時には、元は直交してい た繊維織物の縦糸と横糸が織物の変形によって直交しなくなり、元の織物とは別の浸 透係数を持つようになると考えられる。このため、ドレーピングによってプリフォー ムを製作した場合に含浸シミュレーションを行うためには、あらかじめ変形した織物 の浸透係数を求めておく必要がある。

平織や朱子織の織物では一般に、その浸透係数は縦糸横糸の方向に異方性を持ち、 織物上のある1点から2次元的に樹脂を含浸させた場合、そのフローフロント(樹脂 が含浸した部分の先端)形状は、通常は図1.1.4-5に示すように、織物の縦糸横糸方 向を長短の軸とする楕円形となる。このため、同じく図1.1.4-5に示すような縦糸横 糸方向の1次元の浸透係数を測定すれば、得られた浸透係数は楕円の長短軸上(浸透 係数が最大・最小となる方向)のフローフロントを観察することになるため、座標変 換によって任意方向の浸透係数を求めることができる。しかし、繊維織物の織目がド レーピングによって変形した場合、浸透係数が変化するだけでなくフローフロントの 楕円の長短軸が縦糸横糸の方向に一致しなくなると考えられ、(2)座標変換によって任



図 1.1.4-5 繊維織物への樹脂含浸の模式図



図 1.1.4-6 ガラス繊維織物の変形方法

意方向の浸透係数を求めることができなく

なる。そこで、繊維織物の織目が変形した場合の楕円の長短軸方向を求める試験を行った。

図 1.1.4-6 に繊維織物の変形方法を、図 1.1.4-7 に変形した織物の含浸試験方法を 示す。楕円形のフローフロントの、主軸の縦糸方向に対する角度を測定するために、 200mm × 200mm のガラス繊維織物(平織)の中央部に直径 20mm の穴をあけて、ここ から樹脂代用のシリコンオイルを含浸させた。また片面をガラス板として、含浸中の 様子や楕円の長軸短軸の角度を観察できるようにした。金型のキャビティ厚さは 1mm である。

図 1.1.4-8 および 9 に、観察されたフローフロント形状(変形量 0°、25°)の例 を示す。繊維体積含有率 (V_i) は約 39%である。変形量 0°、25°ともフローフロント は楕円形となり、変形量の増加とともに楕円の(短軸/長軸)比が減少する傾向が見 られた。しかし、楕円長軸の傾きは測定されなかった。この原因として、 $\mathbb{O}V_i$ が比較 的低いため織目の変形の影響が表れにくい、②織物にあけた穴の形状が整った円形で ないためフローフロント形状が乱れて軸の傾きが表れにくい、③金型構造上の問題に より金型キャビティに微妙な厚み分布 (= V_i の分布)ができている、などが考えられ るが、詳細な原因は不明であり、試験方法の再検討を要する。



図 1.1.4-7 樹脂 (シリコンオイル) 含浸試験方法





シミュレーション デモンストレータでは図 1.1.4-10 に示すようなRTM一体成形パネルを隔壁部に

b) デモンストレータモデルの樹脂含浸シミュレーションおよびプリフォーム製作



図 1.1.4-8 変形量 0°の場合の含浸



図 1.1.4-9 変形量 25°の場合の含浸

アクリル板と透明なバッグフィルムで密閉して樹脂の流動フロントが可視化される状態で含浸を行い、流動フロント形状をバッグフィルム上に記録した。結果を図1.1.4-15



この供試体に対し、上側桁付パネルへの樹脂含浸のシ

図 1.1.4.14 3 次元の R T M 供試体形状

ミュレーションを実施した。シミュレーション用のモデルを図 1.1.4-16 に、シミュレ



1.1.4・15 流動フロント可視化実験結果

ーションにより求められた流動フロントの推移を図 1.1.4-17 に示す。シミュレーショ

ンの結果は可視化実験の結 果と定性的には概ね一致し た傾向を示しているが、シミ ュレーションでは桁部の下 の樹脂通過孔からも樹脂が 含浸されている点が実験と は異なっている。実験では密 閉されたバッグフィルム内 を真空引きしてプリフォー ムに樹脂を含浸させており、 この際に桁の付根の部分が 圧迫された結果、この部分の 繊維含有率が大きく、あるい は樹脂の透過係数が小さく



図 1.1.4-16 樹脂流動シミュレーション用モデル

る硬化サイクル(昇温速度)を設定することが可能である。しかしながら、熱化学モ デルによる予測のためには部材表面からオートクレーブ雰囲気への総括伝熱係数を知 る必要があるが、この伝熱係数はバギングの状態やオートクレーブ内での部材配置及 び窒素ガス流動状態などによって大きく異なることが予想される。そこで部材表面温 度とオートクレーブ雰囲気温度のモニタリングデータから総括伝熱係数を推算し、熱 化学モデルにより部材温度を予測して、過昇温が生じないようにオートクレーブ雰囲 気の昇温速度を制御しながら成形するという、知的成形プロセスのアルゴリズムが考 えられる。また、昇温速度を十分小さくすれば過昇温を防ぐことができるが、成形時 間が長くなるため、過昇温を抑えられる範囲内で昇温速度をできるだけ大きくする制 御が必要である。

ここでは、温度としては CFRP 表面及びオートクレーブ雰囲気の2点のみをモニタする、単純な制御を考える。基本的な手順は以下のようになる。

① CFRP 表面温度のモニタリングデータから、硬化度及び硬化速度を常時計算しておく。

② 昇温過程において、CFRP 表面温度の時間変化及びオートクレーブ雰囲気との温 度差を取得し、これを基に CFRP 表面とオートクレーブ雰囲気との間の総括伝熱係数、 及び単位面積・硬化速度あたりの反応熱量を推算する。

③ 推算したパラメータを基にその後の CFRP 温度の変化を予測し、過昇温の大きさ があらかじめ設定した許容値を下回るような昇温速度を探索する。

④ オートクレーブの運転条件を、③で探索した昇温速度に再設定する。

この知的プロセス制御手順を用いて、タフエポキシ樹脂系プリプレグ(三菱レイヨン 製、MR50K/#982、一方向材)88層(約12mm)の厚板平板の成形を試みた。なお、H10 年度に同じ厚板平板を知的プロセス制御を用いず、昇温速度2℃/分、保持温度183℃ で成形しており、その際の過昇温は約18℃であった。(図1.1.4-19)

過昇温の許容値を 3℃に設定して知的プロセス制御を行った場合の CFRP 温度とオートクレーブ雰囲気温度を図 1.1.4-20 に示す。初期の昇温速度は 2℃/分に設定されていたが、雰囲気温度 132℃付近から昇温速度を小さくする制御が行われ、166℃付近までは平均約 1.4℃/分、さらに 166℃から 179℃までは 0.6℃/分となっている。ここで反応速度がピークを過ぎたため、179℃から 183℃までは再び約 2℃/分の昇温速度となり、183℃に達した後、設定された時間(2時間)保持されている。この制御によって過昇温は約 4℃となり、設定された許容値よりはやや大きいものの、制御なしの場合と比べて 1/4 以下になっている。また昇温速度を途中で小さくしたことによる硬化サイクル時間の延長は、約 25 分であった。

実際のオートクレーブ成形においては、CFRP 表面温度が設定された硬化サイクルに 従うよう、オートクレーブの加熱・冷却を制御する「物温制御」が一般的に行われて いる。反応熱がほとんど発生せず、オートクレーブ雰囲気からの伝熱のみでCFRP が加熱される昇温初期の段階では、物温制御は有効である。しかしながら硬化反応に よる発熱が進行する段階では、特に発熱量の大きい厚板の場合、図 1.1.4-19 に示すよ うに反応のピーク時に急激に CFRP 温度が上昇する結果、オートクレーブの冷却能力で は制御できなくなる可能性もある。即ち、物温制御では過昇温を防ぐことが困難な場 合もある。

知的プロセス制御では、反応熱による温度上昇が始まる前の段階で、CFRP温度 の推移を予測した結果に基き、雰囲気温度を制御することで、過昇温を防ぐことがで きる。



図 1.1.4-20 厚板(88 層)成形時の過昇温ー過昇温制御

ii) RTM 成形

H11 年度に、2個の注入口を有する2次元系の RTM 樹脂流動シミュレーションを実施し、個々の注入口の開閉を適切に制御することにより、含浸不良(ドライスポット発生)を防ぐことのできることを示した。(図 1.1.4-21) この系に対して知的プロ セス制御を行って樹脂含浸を最適化する統合化プロセスシステムの例(概念図)を図 1.1.4-22 に示す。



図 1.1.4-21 複数の注入口を有する系の流動フロントのシミュレーション



図 1.1.4-22 R T M 成形の統合化プロセスシステムの例

モールド内には大阪市立大学で開発された流動フロントモニタ用櫛型誘電センサ⁴⁾ が設置され、シミュレーションによって最適化されたタイミングにあわせて2個の注 入口の開閉を行う。また実際のプリフォームでは場所による繊維含有率(及びそれに 伴って樹脂透過係数)の違い等により、モニタされた流動フロントの形状がシミュレ ーションの結果と異なることも予想される。この場合も、例えばシミュレーション結 果と比較して一方のセンサの流動フロント位置が進んでいる場合には、そのセンサに 近い側の注入口を一時的に閉鎖することによって、シミュレーションにより最適化さ れた流動フロント形状に合わせることもできる。

このような知的プロセス制御により、ドライスポット等の含浸不良を防ぐことができ ると考えられる。

a) RTM成形制御装置の製作

RTM成形の樹脂含浸過程の制御には、シミュレーションによって事前に含浸を予 測し、その結果を利用して樹脂加圧力を制御する方法が提案されているが⁵⁾、実際の 成形では金型へのプリフォームのセット状態などによって、シミュレーションでは予 測できない含浸状態が起こる可能性がある。そこで本研究では、図 1.1.4・23 に示すよ うに事前のシミュレーションと、実際に含浸をセンサによってモニタした結果とを組 み合わせて樹脂の加圧力を制御する方法の検討を行なうとともに、そのための制御装 置を製作した。製作した制御装置の外観を図 1.1.4・24 に示す。樹脂を加圧するための 4 系統の圧縮空気配管に電磁式開閉弁と自動圧調整弁が取り付けられ、パーソナルコ ンピュータからの信号によって作動する。平成 13 年度からは本装置による制御試験を



図 1.1.4-23 RTM 成形制御方法模式図

行なうとともに、得られた制御方法をデモンストレータ「RTM一体成形パネル」へ



図 1.1.4-24 製作した RTM 制御装置(圧力制御弁・配管部)

適用していく。

iii)精密プレス成形の制御

得られたモニタ方法を用いた熱可塑性 FRP のプレス成形制御方法について検討する とともに、実際に CFRP 積層板の成形制御試験を行なった。制御方法の概要を図 1.1.4-25 に示す。加熱段階初期では、樹脂がまだ溶融していないため加圧力は小さく しておき、プリプレグの樹脂の溶融がセンサによってモニタされたところで加圧力を 上げて、材料を製品形状とする。さらに、樹脂の固化がセンサによってモニタされた



Time

図 1.1.4·25 誘電率式センサを利用した熱可塑性 FRP プレス圧力制御方法の概要



図 1.1.4-26 誘電率式センサを利用した制御によって成形された CFRP 平板の外観

ところでプレスによる加圧力を上げて(手動入力)、樹脂の収縮によるボイド等の成形 不良の発生を防ぐ、というものである。図 1. 1. 4-26 に実際にセンサ出力を元に圧力制 御を行なって成形した CF/PEEK 積層板(平板)の外観を示す。良好な状態に成形を行 なうことができた。今回得られた結果によって実際のプレス成形品についても、成形 モニタと制御による試作回数の削減や成形不良の減少が期待できるが、より完成度の 高い制御法とするためには次の課題を解決することが必要である。①加圧時期だけで なく、加圧力の大きさ(値)を求める方法の開発、②センサ出力から加圧力を自動的 に制御するソフトや装置の開発、③実部品の曲面を持つ金型形状に合った金型埋込み センサの製作。(テーマ終了)

参考文献

 P. R. CIRISCIOLI, G.S.SPRINGER; "Smart Autoclave Cure of Composites", Technomic Publishing Co., Inc. (1990)

2) M. K. KANG, J. J. JUNG and W. I. LEE, Composites A, 31 (2000), 407

 Y. F. CHEN, K. A. STELSON and V. R. VOLLER; "Prediction of Filling Time and Vent Locations for Resin Transfer Molds", Journal of Composite Materials, vol.31, pp.1141 (1997)
 S. MOTOGI, T. ITOH, T. FUKUDA; "Multi-Functional Sensor Properties and 2-dim Flow Detection for RTM, Proc. 6th Japan International SAMPE Symposium, pp.1033
 J. SLADE, E. M. SOZAR and S. G. ADVANI, J. of Reinforced Plastics and Composites, 19 (2000), 552

1.2 達成状況

本研究の研究内容は、(1)知的成形プロセス技術と、(2)母構造とセンサ・アクチュエー タ等の一体化技術に分けられる。以下、各項目について本年度の達成状況を述べる。

(1) 知的成形プロセス技術

(a) センシング技術の開発

本年度は、基本的に 111 年度までに得られた各センサの測定機能について、改良を行い、 実用化への技術開発を目的に検討を行った。本研究では、H11 年度までに RTM 成形におい て金型への設置が簡単で成形品へ埋め込むことなくマトリックス樹脂のフローフロントを 測定でき、また同時に、その硬化状態を検出できる多機能なセンサを新しく開発した。実 用化を目標として検討した結果、それまで実用上重要であるがセンサの特性上、適用が困 難であった CFRP の成形にも適用できる技術を開発した。また、H11 年度までに、従来主に アクチュエータとして注目されてきた圧電セラミックスを使ってマトリックス樹脂の硬化 状態を検出する技術を新しく開発した。本年度は、圧電セラミックスセンサの成形品の内 部に埋め込むことが容易なセンサの改良に成功した。この点は、特に、実用上重要である と考えられる。また、埋め込み方向、および成形品の板厚の測定への影響についても明ら かにした。光ファイバセンサについては、従来使用してきた EFPI センサに加えて、新しく FBG センサについても、内部ひずみ測定へ適用できることを目標にして検討した。検討の 結果、FBG センサを RTM 成形に適用してその内部ひずみ測定が可能であることを示すこと ができた。EFPI センサについては、H11 年度までに従来注目されなかった硬化収縮ひずみ の検出が可能であることを示した。本年度は、さらに、実用化に向けて、センサの剛性等 を検討することにより、硬化収縮ひずみを感度よく検出できることを実証した。この点は、 光ファイバセンサを成形品の内部に埋め込む場合には、誘電率センサなどを埋め込む必要 がなく、有用な機能であると考えられる。誘電率センサについては、本年度、実用上有用 な CF/PEEK を対象に、H11 年度まで得られた成果に基づき、その成形過程における溶融粘 度変化を検出できることを示した。

以上、本年度は各種センサの実用化を目標に研究開発を行ったが、その結果得られた成 果は、H11 年度まで得られた基本的なセンシング機能を改良し、実用化に向けた種々の技 術を開発することに成功したことであり、当初の目的を充分達成できたものと考えられる。 (b) モデリング技術および統合化プロセスシステムの開発

本年度は、モデリング技術に基づき、成形シミュレーションを行って、最適プロセス制 御を完成すべく、制御アルゴリズムの開発等の基礎技術の確立を目標として検討した。

オートクレーブ成形については、厚板を成形する場合に問題となる過昇温を回避するこ とを目標として、成形温度に着目したスマートマニュファクチャリングシステムを構築し た。構築したシステムは、内部温度のモニタリングと H11 年度に検討したマトリックス樹 脂の熱化学モデルによる温度予測に基づき、過昇温を回避するようにオートクレーブの昇 温速度をコントロールするように構成されている。実際に 88 層の CFRP 積層板について実 証実験を行い、システムの有用性を確認した。RTM 成形については、デモンストレータを 製作する上で、立体形状を有するプリフォームの作製およびプリフォームへの樹脂の含浸 状態のシミュレーションが必要である。本研究では、立体形状を有するプリフォームの作 製にはドレーピングを採用することとし、そのドレーピングによって織物の繊維角が変化 した場合に関して、樹脂の浸透係数の計測について検討を行った。さらに、樹脂の金型へ の注入をコントロールすることが可能なスマート RTM 成形機を製作した。FRTP の精密プレ ス成形については、誘電率センサによる樹脂の溶融粘度変化のモニタリングにしたがって、 成形機の加圧制御を行い、プレス成形が可能な成形システムを作製した。そして、実際に、 CF/PEEK 積層板について、ボイドなどの欠陥がない、良好な積層板を成形できることを実 証した。

以上、いずれの成形法においても、目標であった最適制御アルゴリズムを作成し、さら に、オートクレーブ成形および精密プレス成形については、モニタリング項目は限られた ものであるが、実際に成形システムを製作し、成形実験によりその有用性を実証すること ができた。また、RTM 成形においても基礎的な制御アルゴリズムについて検討し、成形条 件をリアルタイムで制御可能な RTM 成形機を完成した。

(2) 母構造とセンサ・アクチュエータ等の一体化技術

センサの成形品内部への埋め込みによる測定への影響を明らかにし、センサの埋め込み 技術を確立することを目的として、EFPI 光ファイバセンサおよび圧電セラミックスセンサ について検討した。その結果、EFPI センサについては、H11 年度までの圧縮、せん断負荷 の影響の解明に加えて曲げ負荷の影響が明らかになり、成形圧力のひずみ測定へ及ぼす影 響がわかった。また、圧電セラミックスセンサについては、埋め込みに適したセンサの改 良に成功した。これらの成果は、当初の目標を充分、達成するものである。

センサ・アクチュエータ埋め込みによる母構造への力学的性質の影響については、セン サ・アクチュエータを埋め込んだ試験片について、静的および疲労試験を行って埋め込み の有無による強度比較を行うのではなく、センサ・アクチュエータ埋め込み部の破壊過程 をその場観察により調べ、埋め込みによる強度特性への影響を明らかにする手法を採用す ることとし、その実現を目標に検討を行った。まず、その場観察が可能な小型負荷試験機 を設計・製作し、その組立て調整を行った。また、センサが埋め込まれた微小部分のひずみ 分布を測定することが可能なレーザーひずみ測定機によるひずみ観察について検討した。 そして、小型負荷試験機と組み合わせ、その場観察が可能な実験システムを完成した。こ の成果は、静的および疲労強度への埋め込みの影響を調べる上での基礎的な実験準備を完 了したことを意味し、当初の目的を実現できたものと考えられる。

- 1.3 結論
 - (1)知的成形プロセス技術
 - (a) センシング技術の開発

本年度は、本研究で検討している光ファイバセンサ、圧電セラミックスセンサ、フロー

フロント・硬化状態検出多機能センサおよび誘電率センサについて、基本的に H11 年度ま でに得られたモニタリング機能の改良を行い、実用化への技術開発を目的に検討を行った。 その結果、光ファイバセンサについては、従来から使用している EFPI センサの硬化収縮ひ ずみ検出機能の改良および FBG センサの内部ひずみ測定への適用を行った。圧電セラミッ クスセンサについては、埋め込みが容易で母構造への影響が少ないセンサの改良に成功し た。フローフロント・硬化状態検出多機能センサでは、CFRP への適用が可能となり、誘電 率センサについては、CF/PEEK の精密プレス成形への適用が可能になった。

(b) モデリング技術および統合化プロセスシステムの開発

本年度は、モデリング技術に基づき、成形シミュレーションを行って、最適プロセス制 御を完成すべく、制御アルゴリズムの開発等の基礎技術の確立を目標として検討した。そ の結果、いずれの成形法においても、目標であった最適制御アルゴリズムを作成し、さら に、オートクレーブ成形および精密プレス成形については、モニタリング項目は限られた ものであるが、実際に成形システムを製作し、成形実験によりその有用性を実証すること ができた。また、RTM 成形においても基礎的な制御アルゴリズムについて検討し、リアル タイムで成形条件が制御可能な RTM 成形機を完成した。

(2) 母構造とセンサ・アクチュエータ等の一体化技術

センサの成形品内部への埋め込みによる測定への影響を明らかにし、センサの埋め込み 技術を確立することを目的として、光ファイバセンサおよび圧電セラミックスセンサにつ いて検討した。その結果、光ファイバセンサについては、成形圧力のひずみ測定への影響 を明らかにした。また、圧電セラミックスセンサについては、埋め込みに適したセンサの 改良に成功した。

センサ・アクチュエータ埋め込みによる母構造への力学的性質の影響については、セン サ・アクチュエータを埋め込んだ試験片について、静的および疲労試験を行って埋め込み の有無による強度比較を行うのではなく、センサ・アクチュエータ埋め込み部の破壊過程 をその場観察により調べ、埋め込みによる強度特性への影響を明らかにする手法を採用す ることとし、まず、その場観察が可能な小型負荷試験機を設計・製作し、その組立て調整を 行った。そして、小型負荷試験機と組み合わせ、その場観察が可能な実験システムを完成 した。

- 2. 研究発表・講演、文献、特許等の状況
 - 2.1 研究発表·講演

-

			発表期日
スマートRTM成形のための多機能 センサの開発と樹脂浸透流れのシ ミュレーション	元木、中出、福田	日本複合材料学会2000 年度研究発表講演会	2000.5.30
EFPI光ファイバセンサによるFRP積 層板のひずみ測定に及ぼすセンサ への横荷重の影響	逢坂、高坂、川崎、 福田 	日本複合材料学会2000 年度研究発表講演会	2000.5.30
Novel Sensor Development for Resin Front Detection in RTM	S. Motogi, K. Yamagishi and T. Fukuda	The 2nd Asian- Australasian Conf. on Composite Materials	2000.8.18
An Overview of Cure Monitoring in Composites Molding Process	T. Fukuda and T. Kosaka	The 2nd Asian- Australasian Conf. on Composite Materials	2000.8.20
Effects of Discrepancy of Optical Axis in EFPI Sensors on Measurement of Strains in GFRP Laminates	K. Osaka, T. Kosaka, Y. Kawasaki and T. Fukuda	The 2nd Asian- Australasian Conf. on Composite Materials	2000.8.20
Measurement of Internal Strains in FRP Laminate with EFPI Optical Fiber Sensor during Autoclave Molding; Measurement in Off-axis Directions	K. Osaka, T. Kosaka, Y. Asano and T. Fukuda	The 2nd Asian- Australasian Conf. on Composite Materials	2000.8.20
Effects of Pressure on Measurement of Strains in EFPI Optical Fiber Sensors embedded in FRP Laminates	K. Osaka, T. Kosaka, Y. Kawasaki and T. Fukuda	The 2nd Asian- Australasian Conf. on Composite Materials	2000.8.20
Cure Monitoring for Fiber Reinforced Plastics by Piezoelectric Ceramics	N. Oshima, K. Aoki, S. Motogi and T. Fukuda	The 2nd Asian- Australasian Conf. on Composite Materials	2000.8.20
オートクレーブ成形におけるEFPI光 ファイバせんさによるFRP積層板の 硬化ひずみの検出	逢坂、高坂、浅野、 福田	第25回複合材料シンポ ジウム	2000.10.6
圧電セラミクスによる複合材料積層 板の硬化モニタリング(-複合材料 積層板の成形条件が圧電セラミク スのインピーダンスにおよぼす影 響-)	大島、青木、元木、 福田	第25回複合材料シンポ ジウム	2000.10.6

	発表者	発表先	発表期日
Pattern recognition application in	A Talaie, N.	Smart materials MEMS,	2000.12.13
classification of intelligent	Esmaili, J-Y Lee,	SPIE	
composites during smart	T. Kosaka , N.		
manufacturing using a C4.5 machine	Oshima , K. Osaka ,		
learning program	Y. Asano and T.		
	Fukuda		
EFPI光ファイバセンサのひずみ測	崔、逢坂、高坂、福	第30回FRPシンポジウ	2001.3.15
定に及ぼす曲げモーメントの影響	田	Д	
圧電セラミクスによる複合材料積層	大島、青木、元木、	第30回FRPシンポジウ	2001.3.15
板の硬化モニタリンク(積層構成が	福田	4	
注電セラミクスのインビータンスに			
およはす影響)			

2.2 文献

該当なし

2.3 特許等

該当なし

2.4 その他の公表

該当なし

第Ⅲ章

アクティブ・アダプティブ構造技術の開発

1.研	究開	発の成果と達成状況	105
1.1	研究	光開発の成果	105
	要	約	105
1.	1.1	アクティブ・アダプティブ・グループ全体	107
1.	1.2	知的材料・構造システムの解析モデルの確立と基礎データの収集	110
1.	1.3	機内騒音軽減技術の開発	120
1.	1.4	梁構造の振動低減	129
1.	1.5	分布力学系制御技術の研究開発・・・・・	144
1.	1.6	Development of High Damping Composites Embbeding Shape	
		Memory Alloy	154
1.	1.7	スマート・ストラクチャの静粛化に関する研究	164
1.2	達成	戈状況	174
1.3	結論	<u>н</u>	175
2.研	「究発	表・講演、文献、特許等の状況	176
2.1	研究	究発表・講演	176
2.2	文蘭	伏	178
2.3	特詞	午	179
2.4	その	D他の公表(プレス発表等)	179

1. 研究開発の成果と達成状況

1.1 研究開発の成果

要 約

今年度は、グループとしては最終年度となるため、主に、母構造、センサ、アクチュエ ータを一体化した構造要素または小型構造物を製作し、確立した計測・制御技術をこれら に適用し、その適用効果を実証した。また、使用環境に応じ最適なアクティブ・アダプテ ィブ構造物を設計するための指針を得るために、知的材料の基礎データの収集および解析 モデルの確立を行った。

具体的には、圧電材料を用いたアクティブ制御技術に関しては、600×600mm²の複合材 料板要素の振動・騒音制御を行い、目標である減衰係数の 20%程度以上向上、騒音の音響 パワーの 30%程度以上低減を達成した。また、分布センサ・アクチュエータ系の計測・制 御技術を確立し、直径 1m の柔軟宇宙アンテナ構造物の形状・振動制御に適用し、確立し た計測・制御技術の適用効果を実証した。

電気粘性流体を用いたセミアクティブ制御技術に関しては、電気粘性流体を封入した長 さ 800mm の複合材料梁要素を製作し、振動制御効果を計測し、得られたデータに基づい た数値解析により、実構造物に対し目標である振動荷重の 50%低減が可能であることを確 認した。

形状記憶合金を用いたパッシブ減衰技術に関しては、減衰効果に直接関係する応力---ー温度ヒステリシスループの荷重周波数による影響および繰返特性を調べ、減衰材料とし ての可能性を示した。また、熱力学的エネルギ理論より導出した解析モデルより計算した 結果が、これらの実験結果の特徴を定量的に捉えられることを示し、モデルの妥当性を実 証した。さらに、この解析モデルによる数値解析、形状記憶合金箔を接着したアルミ合金 梁の予備振動試験で得られた結果を踏まえ、形状記憶合金を埋込んだ複合材料を設計、製 作し、減衰係数を約3倍向上できることを示した。

最後に、これらのアクティブ/パッシブ制御技術をデモンストレータまたは実構造物に 適用する場合におけるスマート材料の仕様を示すとともに、それらの制御効果を検討した。

- Summary -

Since this year was the last year for our group, mainly, we made structural elements or small demonstrators which consisted of a host structural element, sensors, and actuators, and we demonstrated the effectiveness of the measurement and control technologies that we had established. In addition, we collected fundamental data and established analytical models of smart materials to obtain the guide to designing an active-adaptive structure optimally against the surrounding environment. Specific results are shown as follows.

With respect to active control technology using piezo-electric materials, vibration

and noise control of a 600×600 mm² composite plate was performed, and the target of increasing damping coefficient by more than 20% and decreasing sound intensity by more than 30% could be achieved compared with the case without control. In addition, measurement and control technology using distributed sensor and actuator system was established, it was applied to shape and vibration control of a flexible space antenna structure with a diameter of 1m, and the effectiveness of the established measurement and control technology was verified.

With respect to semi-active control technology using electro-rheological fluid, an 800mm-length composite beam with electro-rheological fluid enclosed was made, and the effectiveness of damping was measured. By numerical analysis using the obtained data, it was confirmed that the target of 50% reduction of the vibration load could be achieved for a real structure.

With respect to passive damping technology using shape memory alloys (SMA), first, we examined the effects of loading frequency and loading cycles on stress-strain-temperature relationship that directly affected damping performance and showed they were a feasible damping material. Numerical results obtained by using the proposed model that was derived from thermodynamic energy theory could capture the features of the obtained results quantitatively, that suggested the validity of the model. Based on the results of numerical analysis using this model and preliminary vibration tests of beams with SMA films bonded, composite beams with SMA wires embedded were designed and made, and it was found that the damping coefficient could be increased by approximately three times compared with blank composites without SMA.

Further using these obtained results we showed the requirements and specifications for the smart materials in the case where the active/passive control technologies were applied to the demonstrator or real structures and evaluated the effectiveness of these control technologies. 1.1.1 アクティブ・アダプティブ・グループ全体

(1) 研究開発の目的

振動・騒音制御技術の完成度を高め、制御手法の確立を図るため、制御技術の向上に直接的に有効なアクチュエータ、センサ機能を有する材料素子の開発に対する要求、仕様を 明らかにするとともに、それらの材料、素子を付加した構造材の製造を実現するように、 マニュファクチャリングの開発に対する要求、仕様も提示する。

(2) 全体計画における 12 年度の位置付け

- (i) 全体計画
- (a) スマート構造物のアクティブ・アダプティブ制御システム技術の研究

アクティブ・アダプティブ制御に必要な母構造、センサ、アクチュエータ等の仕様を 明らかにしてこれらを同時に最適化し、かつ集中・分布定数系制御等の新制御理論を適 用して、高効率で高信頼性の制御システム技術を開発する。

構造要素へ集中・分布変数系制御等のアクティブ・アダプティブ制御システム技術を 適用して、減衰係数を 20%程度以上向上させ、また、騒音の音響パワーを 30%程度以 上低減させる。

(b) 大型複雑構造要素への適用化技術の開発

航空宇宙、高速車両等に用いられる曲面板パネル等からなる構造物について、外荷重 による応力の制御、振動、外部騒音に対する減衰、形状等の制御を実現するために、ア クティブ・アダプティブ制御システム技術を適用する技術を開発する。

母構造、センサ、アクチュエータ等を一体化した構造物要素について、アクティブ・ アダプティブ構造技術の適用効果を実証する。

(ii) 12 年度の位置付け

11 年度までに、アクチュエータ・センサ材料素子である圧電セラミックス、圧電フィルム、電気粘性流体、形状記憶合金の基礎的特性評価、振動・騒音制御則の設計および数値 解析による検証、分布系センサシステムの確立、電気粘性流体を封入した梁要素供試体の 製作および振動特性評価、形状記憶合金ワイヤと梁からなる構造物の減衰特性評価などを 行い、アクティブ・アダプティブ制御システム技術を構造物要素に適用する場合、減衰係 数の 20%程度以上向上、音響パワーの 30%程度以上低減などの目標達成の可能性を確認した。

12年度は最終年度となるため、11年度までに得られた成果を踏まえ、母構造、センサ、 アクチュエータを一体化した構造物要素または小型構造物を製作し、確立した計測・制御 技術をそれらに適用し、その適用効果を実証する。さらに、得られたデータを基に、デモ ンストレータおよび実構造物要素に確立した技術を適用する場合の材料素子に対する要求 仕様を明らかにするとともに、その制御効果を示す。また、使用環境に応じて最適なアク ティブ・アダプティブ構造物を設計するための指針を得るために、知的材料の基礎データ の収集および解析モデルの確立を行う。 (3) 12 年度研究成果のまとめ

(i)「知的材料・構造システムの解析モデルの確立と基礎データの収集」(名古屋大学)

形状記憶合金ワイヤの減衰特性に直接関係する、応力-歪-温度関係への歪速度の影響、 繰返特性などについて、ダイムラー・クライスラーと協力して計測した。提案している熱 力学挙動解析理論を用いると計測データを定量的に精度良くモデル化できることを示した。 また、形状記憶合金箔を接着したアルミ合金梁は、減衰係数が2倍程度増加することを自 然減衰振動法により明らかにした。ここで、得られた計測データ、提案した解析モデル、 減衰率計測法はダイムラー・クライスラーの研究課題へ応用された。

(ii)「機内騒音低減技術の開発」(川崎重工業)

600×600mm²の複合材料板上に 40×20mm²の圧電セラミックスを 18 枚接着したスマ ート板要素に 11 年度までに確立した制御手法を適用し、振動制御試験および音響制御試験 を実施した。この試験により、目標値である減衰係数の 20%以上向上、音響パワーの 30% 以上低減を達成した。また、試験および数値シミュレーションの結果を基に、得られた成 果をデモンストレータおよび実機に適用する場合における圧電セラミックスの仕様を明確 化した。

(iii)「梁構造の振動低減」(富士重工業)

減衰効果を増幅するために電気粘性流体層を増やした構造要素供試体および圧電材料と 組合わせたハイブリッド構造要素供試体を設計、製作し、振動試験により振動制御効果を 計測した。また、この試験により得られたデータに基づいて有限要素解析を行い、実構造 での振動低減効果を評価した。その結果、これらの構造を実構造に適用した場合に目標で あった振動荷重の 50%低減を達成できる目途が付いたことを確認した。また、実用化に向 けての技術的課題の抽出および対策案を提案した。

(iv)「分布力学系制御技術の研究開発」(東芝)

分布センサ・アクチュエータ系を持つ構造物の計測・制御技術を確立し、確立した計測・ 制御技術の効果を調べるために、柔軟梁構造を支持構造とし、そこにメッシュを張ってア ンテナ反射面を模擬した直径 1m の宇宙アンテナ模擬構造物を製作した。支持構造上に配 置した圧電フィルムセンサ・圧電セラミックスアクチュエータ系に、積分・微分制御則を 適用し、形状・振動制御を行った。制御試験結果より、構造物の変形とそれに伴う振動を 制御することができ、提案した計測・制御技術の有効性を実証した。

(v)「高減衰複合材料システムの開発」(ダイムラー・クライスラー)

名古屋大学が提案した解析モデルを用い、形状記憶合金ワイヤと片持梁を組合わせた構 造の減衰特性を数値シミュレーションにより調べ、形状記憶合金が減衰材料として有効で あることを確認した。また、形状記憶合金ワイヤの疲労試験および減衰係数計測を名古屋 大学と協力して行い、その適用範囲を調べた。形状記憶合金ワイヤの試験、名古屋大学が 行った形状記憶合金を接着したアルミ合金梁の試験結果を踏まえ、形状記憶合金ワイヤを 埋込んだ複合材料梁を設計、製作し、形状記憶合金によるパッシブ減衰の効果を計測し、 振幅が大きい場合には減衰係数が約3倍に向上することを示した。

(vi)「スマート・ストラクチャの静粛化に関する研究」(東京都立科学技術大学)

分布定数系平板構造物に発現するすべての振動モードをクラスタリングできるスマー ト・クラスターセンサを提案し、その設計法を明らかにした。また、センサの形状関数を 提示し、センサの貼付方向を考察した後、周辺単純支持鋼板を対象とした実験によりスマ ート・クラスターセンサの正当性を実証した。 1.1.2 知的材料・構造システムの解析モデルの確立と基礎データの収集

(1) 序論

形状記憶合金(Shape Memory Alloys; SMA)は、負荷によって発生した数%の歪が、 除荷することのみで回復する擬似弾性効果と加熱により回復する形状記憶効果という性質 を持っている。この時、応カー歪関係は大きなヒステリシスループを描き、その面積に相 当する歪エネルギが散逸されるので、SMAは、アクチュエータ材料の他、減衰材料、衝撃 吸収材料としての利用が期待されている。また、材料・構造の軽量化、高効率化の観点か ら考えると、SMA を単体の材料として用いるよりも、他の機能材料と複合化した知的複合 材料・構造として用いた方が有利であると考えられる。

しかしながら、上述のような SMA の変形挙動は、高温で安定なオーステナイト相 (A 相) と低温で安定なマルテンサイト相 (M 相) との間の相変態、M 相の兄弟晶間の変形、転位 などに起因し、温度、変形速度、変形の繰返回数によって変化するなど非常に複雑である。 また、複合材料に関しても、機能材料繊維の変形や製造過程で生ずる残留応力による微小 亀裂および剥離の影響や機能材料の発熱などによる温度変化の影響で、その特性が変化す る。このため、SMA や複合材料に生ずる現象を理解し、それらを構造要素として適用する ためには、多くの基礎実験データ収集及びその解析、変形挙動のモデルの提案、さらに、 それに基づく構成則等の理論の確立が不可欠である。

名古屋大学では、SMA により減衰性能を向上させた複合材料の開発を目指して、SMA および複合材料に関する研究を行ってきた [1-6]。SMA に関しては、SMA 各相の自由エネ ルギ関数に、相変態中のエネルギ散逸を表す相干渉エネルギ関数(Phase Interaction Energy Function; PIEF)を加えたエネルギ関数を定義し、このエネルギ関数を基に、準静 的な疑似弾性挙動時の変態応力を予測する解析モデルを提案した [1-3]。また、SMA 線材 を付加した質点-バネ系モデルを用いた数値解析により、SMA の疑似弾性効果によるヒス テリシスが系の減衰に有効に働くことを示した [4]。さらに、相変態時の熱の発生・吸収、 周囲の媒体へ伝達による合金の温度変化を表す熱エネルギ方程式と組合わせ、変形速度や 熱伝達の影響を考慮することができるように改良した [5, 6]。複合材料に関しては、マイク ロメカニクスモデルにより SMA 繊維強化複合材料の減衰特性を調べ、SMA による複合材 料の減衰性能改善の可能性を示した [7-9]。

平成 10、11 年度には、SMA および複合材料に関して、繰返荷重の与え方と周囲温度が SMA の繰返特性に与える影響の計測、SMA の形状記憶効果を表すモデルの提案 [10-12]、複合材の繊維・中間層・母材の三層モデル [13-15] の提案を行った。

本年度は、さらにこれらの研究を進め、以下の3課題の研究を行った。

- (i) 基礎データの収集として、SMA 線材を負荷する周期荷重の周波数が応力- 歪- 温度 関係に与える影響を調べた。また、このデータを用いて提案したモデルの妥当性を実 証した [16, 17]。
- (ii) 提案しているモデルを発展させ、荷重の繰返による、変形挙動の変化を表すことがで きるモデルを提案した [18, 19]。
- (iii) SMA の減衰材料としての性能を評価するために、アルミ合金に SMA 箔を接着した梁 を製作し、その減衰効果を計測した。

以下にこれらの詳細を示す。

(2) 周期荷重の周波数が SMA の応力- 歪- 温度関係に及ぼす影響 [16, 17]

SMA の応力-歪-温度関係に対し、歪速度を変えて計測を行った McCormik et al. [20] や Wolons et al. [21]の結果から、歪速度が 10⁻⁴ (s⁻¹)以上では、SMA の温度は大きく変化 し、その結果、応力-歪ヒステリシスループの形状も著しく変化することが観察されてい る。このため、減衰材料として SMA を利用するためには、歪速度を変化させて SMA の材 料特性を計測したデータの収集および歪速度の影響を考慮できる解析モデルの作成が必要 である。しかしながら、歪速度を変えて計測したデータは少なく、それらも計測条件や応 カー歪-温度関係の変化の様子などが詳細に示されていない。また、名古屋大学では、熱 力学的エネルギに基づき、歪速度を変化させた場合の応力-歪-温度関係を表すことがで きるモデルを提案しているが [1-3, 5, 6]、このようなことから、モデルの検証を十分行う ことができなかった。

そこで、基礎データの収集として、SMA線材に加える荷重の周波数を変化させ、応力-歪-温度関係の計測を行うと共に、得られたデータを用いて提案しているモデルの妥当性 を実証する。

i) 応力- 歪- 温度関係式 [1-3, 5, 6]

合金全体の熱力学的エネルギ関数を以下のように定義する。 $\phi(z, T) = (1-z) \phi_1(z, T) + z \phi_2(z, T) + \phi_a(z, T)$ (1)

ただし、

$$\phi_{i} = \frac{1}{2} E_{i} (\varepsilon_{i} - \varepsilon_{i0})^{2} - \alpha_{i} E_{i} (\varepsilon_{i} - \varepsilon_{i0}) (T - T_{0}) + C_{i} \left(T - T_{0} - T \log \frac{T}{T_{0}} \right) + S_{0i} T - U_{0i}$$
(2)

 ϕ_i (*i*=1, 2)、*z*、*T*、 ϕ_a 、 ε_{i0} 、 ε_i 、 α_i , E_i 、 C_i 、 T_0 、 S_{0i} 、 U_{0i} は、ヘルムホルツの自由エネルギ、 M 相の体積分率、合金の温度、相変態時に散逸される PIEF、M 相とA 相の結晶構造に関 する歪、各相の歪、熱膨張率、ヤング率、比熱、初期状態での温度、エントロピ、内部エ ネルギである。また、添字 1、2 はA 相、M 相に関する量であることを示す。

この関数に基づくポテンシャルエネルギの停留条件より、変態中の応カ- 歪関係は以下 の式で与えられる。

$$\sigma(z,T,\phi_a) = \frac{-kE\varepsilon_0 + \sqrt{F(z,T,\phi_a)}}{k-1}$$
(3)

$$\varepsilon(\sigma, z, T) = \frac{\sigma}{E_I} + \alpha(T - T_0) + z\varepsilon_0 \tag{4}$$

ただし、

$$F(z,T,\phi_{a}) = k^{2}E^{2}\varepsilon_{0}^{2} + k E^{2}\alpha^{2}(k-1)^{2}(T-T_{0})^{2} + 2k(k-1)E\left(\Psi + \frac{\partial\phi_{a}}{\partial z}\right),$$

$$E_{I} = \frac{kE}{1+(k-1)z}, k = E_{1}/E_{2}, E = E_{2}, \Psi = (S_{01} - S_{02})T - (U_{01} - U_{02}),$$

$$\alpha = \alpha_{1} = \alpha_{2}, C = C_{1} = C_{2}, \varepsilon_{10} = 0, \varepsilon_{0} = \varepsilon_{20}.$$
(5)

また、合金の温度は変態に伴う潜熱、周囲の媒体への熱の伝達、相変態時のエネルギ散 逸によって変化し、その平衡方程式は以下のように与えられる。

$$\rho C dT = \rho H_L dz + \mathcal{O} dt + dE_D \tag{6}$$

ただし、

$$\mathcal{Q} = \frac{4h}{d} \left[T_S - T(t) \right] \tag{7}$$

$$dE_D = \frac{\left\{\sigma - \sigma_{\phi_a=0}\right\} \left\{d\varepsilon + d\varepsilon_{\phi_a=0}\right\}}{2} \tag{8}$$

 ρ 、 H_L 、 \mathcal{O} 、t、 dE_D 、d、h、 T_S は合金の密度、変態潜熱、単位体積、単位時間当たりの合金と周囲の媒体との熱伝達、時間、相変態時に散逸される単位体積当たりのエネルギ、合金の直径、合金と周囲の媒体との熱伝達係数、周囲の媒体の温度である。 $\sigma_{\phi_a=0}$ 、 $\varepsilon_{\phi_a=0}$ はそれぞれ相干渉エネルギがない仮想的な場合の応力と歪である。

式(3)、(4)、(6)より合金に周期荷重が負荷されたときの応力-盃-温度の関係が計算できる。

ii) 実験方法

供試材として、外径 d = 0.75 mmの TiNi 線材(関東特殊鋼㈱製 EF3256)を用い、その 線材を図 1.1.2·1 に示す材料試験機(㈱島津製作所製 EHF-FB10KN10LA)に計測部が無 負荷状態でL = 50 mmとなるように固定し、三角関数状に伸び変形するよう負荷・除荷を 繰返した。荷重 P、伸び δ を、それぞれ、ロードセル、ストローク計で計測し、また、直 径 0.025 mm の T 型熱電対(Omega Engineering, Inc.製)を耐熱テープで線材の中央に固 定することにより線材の温度 Tを同時に計測した。計測は、気温 23℃の静止空気中で行 われた。計測を始める前に線材の変形挙動を安定化させるために、繰返荷重の周波数をf =0.1 Hz、最大変形を $\delta_{max}/L = 0.06$ に設定し、負荷・除荷を 100 回繰返した。本計測では、 周波数を $f = 0.001 \sim 1 \text{ Hz}$ まで変化させ、最大変形を $\delta_{max}/L = 0.055$ に設定して計測を行 った。

iii) 計測結果

図 1.1.2-2 は、周波数 *f* = 0.001 Hz、0.01、0.1、1 Hz に対する、温度-歪(*δ*/*L*)、応力 (4*P*/π*d*²) - 歪関係、図 1.1.2-3 は、*f* = 0.1、1 Hz に対する温度変化の様子を示す。温度-歪、応力- 歪関係では、1 周期目とヒステリシスループの形状がほぼ収束した後の関係を、 それぞれ、計測値は、丸印、四角印、計算値は、破線、実線で表している。この時、*f* = 0.001、



図 1.1.2-1 試験装置

0.01、0.1、1 Hz に対して、ヒステリシスループが収束するまでに、それぞれ、約 2、5、10、20 周期必要であった。

f = 0.001 Hzの場合は、一周期の間の温度変化が 5℃以下であり、変態応力も変態中はほぼ一定となっている。しかし、0.01~1 Hz では一周期の間に 15~20℃の変化があり、この温度変化に伴い、変態応力も大きく変化している。応力-歪関係から、相変態は 1~5% での範囲で生じており、そこでは、概ね負荷時には温度が上昇し、除荷時に温度が下降している。周波数が 0.1 Hz 以下の時は、除荷時の方が負荷時より温度が低く、繰返回数が増す毎に温度が上昇していく。図 1.1.2-3 には、f = 0.1、1 Hz の温度変化の様子を示す。f = 0.1 Hz の場合、一周期の間に温度が約 18℃変化し、繰返毎に平均温度が下降していき、5 周期目ではほぼ収束し、その時、平均温度は 1 周期目と比べ、約 7℃低下している。f = 1 Hz では、一周期の間に約 20℃変化し、周期毎に平均温度は上昇していき、15 周期目には約 2℃上昇している。f = 0.1 Hz では、負荷時と除荷時の温度差が大きく、そのため応力-歪曲線も膨らんだ形状になっており、この時、f = 0.001、0.01、0.1、1 Hz のなかでは減衰は最も大きい。

iv)計算値との比較

また、モデルにより合金の温度変化を詳しく調べると、合金の温度は、M 相への変態時 の発熱、逆変態時の吸熱、応力- 歪関係のヒステリシスにより生ずる熱の合計量と合金と 周囲との熱の伝達量との差により変化する。熱伝達係数に対し、周波数が非常に小さい場 合、発生、吸収される熱の合計量は、概ね周囲とやりとりすることができ、合金の温度は 周囲の温度とほぼ等しくなる。周波数が大きくなると、この熱の発生、吸収に対し、周囲













(c) *f* = 0.1 Hz
図 1.1.2⁻² 温度 − 歪、応力 − 歪関係



(a) f = 0.1 Hz

図 1.1.2-3 温度変化









図 1.1.2-4 繰返特性

ŝ きな影響を与えると考えられ、それらを変化させた計測が必要である。 達特性が支配している。このため、風や湿度など周囲の状況や材料の形状も変形挙動に大 が温度-歪、応カ-伝達量より大きく、合金は外気温より高くなり、周期毎に温度が上昇する。即ち、歪速度 た、周波数がその値より大きい場合は、常に変態およびヒステリシスによる熱の合計量が、 くなるが、それ以降の逆変態過程では外気温より低くなり、周期毎に温度が下降する。ま **吸熱およびヒステリシスにより発生する熱の合計量とが一致し、合金温度は外気温と等し** > の伝達が間に合わなくなり、M相への変態時に温度が上昇し、 周波数がある値以下のときは、除荷の途中で、 歪関係に与える影響は、この場合、主に合金から周囲の媒体への熱伝 周囲への熱の伝達量と変態による発・ 逆変態時に温度が下降

があ 構造材料の振動挙動に近い、 また、 今回は、 歪変化量 0~0.055、 周波数が 0.001~1 Hz までの計測を行ったが、 より小さな歪み振幅でより高周波数の場合の計測も行う必要 今後、

(3) 繰返特性を表すモデル [18,19]

特性を表す A 相へ逆変態せず残留する M 相の割合が増加するモデルを提案し、 が元の状態には戻らないことが考えられる。 そこで、繰返変形の度に、M 相へ変態した後、 る。繰返特性の原因としては、主に、 ければならず、設計の際にこの繰返特性を上手く表現することができるモデルが必要とな 形状が著しく変化する。このため、構造要素に SMA を利用する場合、こ SMA の応力 – 歪関係は、変形が繰返されると、 変態の際、A相と M相の境界面に転位が生じ、 特に、最初の数百回目 このモデルに の性質を考慮しな までの間は、 ᠲ᠇ \mathcal{O} 織运 资形 4 0

数を 11 の時、残留する M 相の自由エネルギ関数を 約R、残留 M 相の体積分率を f(N)、 Nとし、合金全体の熱力学的エネルギ関数を以下のように定義する。 繰返回

残留 M 相は A 相と並列に配置すると仮定し、ポテンシャルエネルギの停留条件より応力-歪関係が求まる。 $\phi(z, T) = (1-z) \{ (1-f(N)) \ \phi_1(z, T) + f(N) \phi_{2R}(z, T) \} + z \phi_2(z, T) + (1-f(N)) \phi_a(z, T) \}$ 9

(2)の装置を用いて準静的状態で計測した N=1、10、100、1000 での応力- 歪関係および 対応する計算結果を図 1.1.2-4(a)、(b)にそれぞれ示す。

計測結果より、以下のことが分かる。①Nの増加に伴い、M相への変態、逆変態開始応 力は減少し、応力- 歪関係は下方へ移動する。②Nの増加に伴い、残留歪みの量が増加し、 応力- 歪関係は右方へ移動する。③M相への変態開始応力の減少量は逆変態のものよりも 大きい。④応力- 歪関係の変形量は繰返の初期段階で大きく、回数が増すに従い小さくな る。計算結果は、これらの4つの特徴を良く捉えており、モデルの妥当性が実証された。

繰返特性も温度により変形挙動が著しく変化する。また、アクチュエータとして SMA を 用いる場合、可逆形状記憶効果による二方向性の利用が考えられるが、この効果の発現に も繰返特性が起因している。今後、これらの性質が表現できるようにモデルを改良するこ とも重要である。

(4) SMA 箔を接着したアルミ合金梁の減衰性能評価

SMA の減衰材料としての性能を評価する第1ステップとして、SMA 箔をアルミ合金に 接着した梁を製作し、片持ち梁の自由減衰を計測する。

試験片として、1. アルミ合金梁(Al 梁)、2. 室温でマルテンサイトである SMA 箔 (MSma)を接着した Al 梁(MSma-Al 梁)、3. 室温でオーステナイトである SMA 箔 (ASma)を接着した Al 梁(ASma-Al 梁)、4. ASma に 4.6%の予歪を与えて接着した Al 梁(PASma-Al 梁)、5. ステンレス箔(SS)を接着した Al 梁(SS-Al 梁)、の5 種類の梁 を製作した。アルミ合金の材質は A5052P、SMA は古河電工製で MSma、ASma の合金配 合は、それぞれ、50at%Ni-50at%Ti、50.5at%Ni-49at%Ti-0.5at%Fe、SS は、SUS304 で あった。また接着剤は、Metlbond1515-3m-0.0325-36"を使用した。試験片の長さ、幅は、 それぞれ、250 mm、20 mm で、厚さは、Al 梁が 2 mm、MSma が 0.04 mm、ASma が 0.05 mm、SS が 0.04 mm、接着層が 0.06 mm であった。

図 1.1.2-5 に示すような、片持梁式減衰計測装置を真空容器内に設置した。片持梁の一端 は固定装置に固定し、自由端にはおもりを付け振動数を 5~10 Hz 程度にした。片持梁の付 根からおもりまでの長さは、180 mm となった。片持梁の初期変位は、たわませた梁の先 端をピンで固定することにより与え、外部スイッチでピンをはずすことにより振動を発生 させた。片持梁の自由減衰振動は試験片の根元に接着した歪ゲージで計測した。

図 1.1.2-6 は 5 種類の梁の振動波形である。この図より、減衰は MSma-Al 梁、PASma-Al 梁、SS-Al 梁、ASma-Al 梁、Al 梁の順に小さくなることが分かる。これらの減衰を定量的 に評価するために、振動数と対数減衰率を計算した。図 1.1.2-7(a)、(b)はそれぞれ振動周 期に対する振動数と対数減衰率を表す。ただし、いずれも、10 周期毎の平均値を示してい る。周期が 100 (約 12 s) 以上となると、特に MSma-Al 梁場合は、振幅が小さくなり、 減衰率を計算する場合、誤差が大きくなる。100 周期までは、ASma-Al 梁、SS-Al 梁、Al 梁の減衰率はほぼ一定の値となるが、MSma-Al 梁、PASma-Al 梁は周期が増加するに従い、 即ち、振幅が小さくなるに従い、減少する。従って、応力-歪関係のヒステリシスが減衰 の原因になっていると考えられる。また、MSma-Al 梁、PASma-Al 梁、SS-Al 梁、ASma-Al



(a) 振動数

(b) 対数減衰率

図 1.1.2-7 振動数と対数減衰率

梁、Al 梁の振動数と減衰率の 0~100 周期までの平均値を計算すると、振動数は、それぞ れ、7.8、7.9、8.9、8.1、7.6 Hz、減衰率は、それぞれ、0.0193、0.0144、0.0117、0.0123、 0.0088 であった。SS-Al 梁と Al 梁の比較より接着層の影響で、減衰率が約 1.3 倍となる。 ASma に関しては、SS と同程度であり、疑似弾性効果のヒステリシスによる減衰は得られ ていないと考えられる。PASma-Al 梁は ASma-Al 梁と比較し約 1.2 倍の増加があり、予歪 みを与えることで、疑似弾性効果が得られ減衰率が増加したと考えられる。MSma-Al 梁は、 Al 梁と比較し、減衰率が 2 倍以上、SS-Al 梁と比較しても 1.5 倍以上増加したことが分か る。このことより、この場合、兄弟晶間の変形による双晶面の移動のため生じる MSma の 減衰が、疑似弾性効果のヒステリシスによる PASma の減衰より効果が大きいことが分か る。

振動数、振幅、使用温度などの使用環境に対して、減衰特性が最適となるような SMA が 設計できれば、さらなる減衰率の向上が期待できる。このため、第2ステップとして、振 動数、振幅、温度を変化させての計測、接着層の剛性・減衰、箔の剛性・減衰などの計測 を詳細に行い、最適設計を行うためのデータの収集と解析モデルの作成を行う予定である。
- (5) 結論
- (i) 歪速度を変えて SMA 線材の応力 歪 温度の計測を行い、提案しているモデルによる予測値と比較した。その結果、それらは定量的に精度良く一致し、モデルの妥当性を示すことができた。応力 歪関係は、合金と周囲との熱伝達の速度の影響を受け大きく変形するので、SMA を構造材料に利用する場合、周囲の環境や合金の形状を設計に考慮することが重要である。
- (ii) SMA の繰返特性を予測するモデルを提案し、計測結果と比較し、その妥当性を実証 した。
- (iii) SMA 箔をアルミ合金に接着した梁を製作し、SMA の減衰材料としての性能を評価した。この結果、減衰率を2倍以上向上することができ、SMA が減衰材料として有効であることを示した。SMA の最適設計を行うことによりさらなる減衰率の向上が期待できる。

参考文献

- T. Kamita and Y. Matsuzaki: Proceed. of SPIE's Symposium on Smart Struct. and Mater. 1996, SPIE 2717, pp. 509-516 (1996).
- 2) T. Kamita and Y. Matsuzaki: Smart Mater. and Struct., Vol. 7, 489-495 (1998).
- 3) Y. Matsuzaki, T. Kamita and A. Ishida: Proceed. of SPIE's Symposium on Smart Struct. and Mater. 1997, SPIE 3241, pp. 230-236 (1997).
- 4) Y. Matsuzaki, T. Kamita, and T. Yamamoto: Proceed. of SPIE's Symposium on Smart Struct. and Mater. 1998, SPIE 3329, pp. 562-569 (1998).
- 5) 松崎雄嗣, 内藤尚, 山本武志:第40回構造強度に関する講演会講演集, pp. 209-212 (1998).
- 6) Y. Matsuzaki, H. Naito, and T. Ikeda: Proceed. of the 10th Int. Conf. Adaptive Structures Technology, Technomic Pub., Lancaster, pp. 208-214 (2000).
- V. Baburaj and Y. Matsuzaki: J. Intel. Mater. Syst. and Struct., Vol. 5, pp. 647-653 (1994).
- 8) V. Baburaj and Y. Matsuzaki: Proceed. of the 5th Int. Conf. on Adapt. Struct., pp. 315-323 (1995).
- 9) V. Baburaj and Y. Matsuzaki: J. Intel. Mater. Syst. and Struct., Vol. 7, pp. 427-432 (1996).
- 10) H. Naito, Y. Matsuzaki, and T. Ikeda: Proceed. of SPIE's Symposium on Smart Struct. and Mater. 2000, [3992-60] (2000).
- 11) Y. Matsuzaki, H. Naito, T. Ikeda: Proceed. of SPIE's Symposium on Smart Struct. and Mater. 2001, [4333-52] (2001).
- 12) 内藤尚, 松崎雄嗣: 日本機械学会 2000 年度年次大会講演論文集, Vol. I, pp. 45-46 (2000).
- 13) V. Baburaj, Y. Matsuzaki, F. A. Nae, and T. Ikeda: 第37回日本航空宇宙学会中 部・関西支部合同秋期大会講演集, pp. 84-85 (2000).
- 14) V. Baburaj, Y. Matsuzaki, F. A. Nae, and T. Ikeda: Proceed. of 11th Int. Conf.

on Adaptive Struct. and Tech., pp. 417-427 (2000).

- V. Baburaj, Y. Matsuzaki, F. Nae, T. Ikeda: Proceed. of SPIE's Symposium on Smart Struct. and Mater. 2001, [4331-01] (2001).
- 16) 内藤尚, 松崎雄嗣, 池田忠繁:第37回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋期 大会講演集, pp. 86-87 (2000).
- 17) 内藤尚・松崎雄嗣: 第10回インテリジェント材料シンポジウム講演要旨集, pp. 28-29 (2001).
- 18) H. Naito, K. Funami, J. Sato, Y. Matsuzaki, and T. Ikeda: Proceed. of 11th Int. Conf. on Adapt. Struct. and Tech., pp. 344-350 (2000).
- 19) 松崎雄嗣, 佐藤純平, 内藤尚, 池田忠繁:第37回日本航空宇宙学会中部・関西支部 合同秋期大会講演集, pp. 88-89 (2000).
- 20) P.G. McCormick, Y. Liu, and S. Miyazaki: Materials Science and Engineering, A167, pp. 51-56 (1993).
- 21) D. Wolons, F. Gandhi, and B. Malovrh: J. of Intelligent Material Systems and Structures, 9, pp. 116-126 (1998).

1.1.3 機内騒音軽減技術の開発

(1)研究開発の目的

この「機内騒音軽減技術の研究」はPZTのセンサ及びアクチュエータ機能を用いたア クティブ・アダプティブ構造を機内騒音軽減に適用するための要素研究として実施したも のである。本年度は小型構造要素供試体を用いて音響制御試験を実施し、アクティブ・ア ダプティブ構造技術の適用により放射音響パワー30%以上の軽減が可能であることを 実証することを目的とする。以下に試験結果について報告する。

(2)小型構造要素供試体の説明

音響制御試験に使用した小型構造要素供試体について説明する。供試体の形状及び 写真を図1.1.3-1、図1.1.3-2に示す。 供試体は600mm×600mm ×1.8mmtのCFRP矩形板と表面に接着された18枚の圧電セラミック(PZ T)で構成される。PZTは40mm×20mm×0.3mmtのPZTを2枚並べる ことで40mm×40mm×0.3mmtの形状を構成している。PZT接着には2液 性エポキシ接着剤を使用した。PZTアクチュエータの配置は計算結果をもとに供試 体の各振動モードの歪みエネルギの大きい部分に決定した。





図1.1.3-1 供試体の概略図

図1.1.3-2 供試体の写真

(3) 小型構造要素供試体の振動特性

小型構造要素供試体の固有振動数、構造減衰、ノーダルラインを確認するために振 動試験を行なった。小型構造要素供試体の1次~11次までの振動モードの固有振動 数と構造減衰の測定結果と計算結果を表1.1.3-1、ノーダルラインを図1.1.3 -3に示す。振動試験結果により得られた固有振動数及び構造減衰を制御則設計用の 計算モデルの修正に反映させた。

	Vibration Test Results			Calculation Results	
	Freq.(Hz)	Damping g	Mode	Freq.(Hz)	Mode
1	45.0	0.010	(1, 1)	45.2	(1, 1)
2	82.6	0.016	(1, 2)	83.4	(1, 2)
3	99.8	0.042	(2, 1)	100.5	(2, 1)
4	138.2	0.030	(2,2)	134.4	(2, 2)
5	140.8	0.030	(1,3)	145.1	(1, 3)
6	166. 5	0.025	(3, 1)	184.1	(3, 1)
7	197.5	0.022	(2, 3)	190.8	(2, 3)
8	220.0	0.027	(3, 2)	215.7	(3, 2)
9	277.6	0.021	(3, 3)	231.2	(1, 4)
10	282.8	0.020	(1, 4)	264.5	(3, 3)
11	286. 5	0.020	(2, 4)	277.9	(2, 4)

表1.1.3-1 小型構造要素供試体の固有振動数と構造減衰



図1.1.3-3 小型構造要素供試体のノーダルライン

(4)音響制御試験の試験構成

音響制御試験の試験構成と試験風景の写真をそれぞれ図1.1.3-4、図1.1. 3-5に示す。音響制御試験は無響室に試験装置を設置して行った。試験装置は制御 装置、音響モニタ装置、振動モニタ装置の3つで構成させる。供試体は残響箱に固定 支持条件で取り付けている。

残響箱内部に設置した2つのスピーカーにより同位相で0~800Hzのランダム ノイズを入射し、供試体を音響加振する。供試体に入射した音響パワーは内部に設置 された4個のマイクロフォンにより計測される。計測された入射音は1.1.3-6に 示すような周波数特性になる。スピーカーの性能により一定の音圧レベルになるのは 100Hz以上で、残響箱の平均音圧レベルは108dBである。

残響箱の外に供試体から放射される音はインテンシティマイク及びマイクロフォン を用いて計測する。これらのマイクを図1.1.3-7に示すようにトラバース装置に 取り付け供試体表面に平行な面内で移動させ49点で音圧レベル及びインテンシティ を計測する。測定結果を音響制御効果の評価に用いた。振動レベルの評価のためPZ Tセンサと供試体表面に取り付けた4個の加速度センサを用いた。



図1.1.3-4 音響制御試験の試験構成



図1.1.3-5 音響制御試験(写真)



図1.1.3-6 残響箱内部の音圧レベル測定結果(1/3オクターブ解析)



図1.1.3-7供試体放射音測定位置の概略図



。古し遮獅寺ちこをあう詣庐花臧廼一でた響音棟放の(土以 ※06) Bb 63.1 おうバーホーバーホの 2 H0 03 ~ 0。るきご 臨 部 ならころ いう に (1,1)、(3,1)、(3,2)モードの 放射音響 パワーを1~154 臣 極感し 51-5.1.1因多果語式し市代で一代で大8、13一0パ響音視知のさん本病判 。さんゆなきでなくこる支肺肺をクーラので置か機値動の引

ーチ(2,2)るいてし 報報 な 機 し 売 し チ (5,1)、 (1) き (2,2) る に か あ る こと お 解 な と て い る (2,2) それぞれ示す。制御なしの場合と比較してビーク位置で1~1548の軽減が可能で 3-12には測定位置(4,4)、(2,2)で計測した音圧レベルのPSD分布図を 射音の音圧レベルを図1.1.3、3-7のように計測した。図1.1.3、図1.1. 状のきらの子。るきで臨新れらごるもで銷行は時間日 D O 2 ~ 0 1 てし 強力と 書のし な噺師を動た一当の至ていまご獲数周のキーチ値競市示ゴI-E.I.I表。市示を市

- E.I.I図。るす眼鏡ブいつぶ果諾魏焼の合課の。0I×8-= __iss Nベトゼぶイ以 °GUZ

別時で田雷大最な諸叵祇印ゴダーエェモセイTTS G おちき大の mig X 。オサち小変う Ⅱ : 3 - 8 で使われている P Z T のナンバーである)、 K _{sein} は 0 ~ - 8 × 1 0⁶ の 範囲 .I図: 6,..., I = i号G) 鄭変スペアでの trainist (出のサイナ歪TZ G お trainist Y

$$\Omega' = K^{gain} G^{iiiiar} X^{ianin''}$$

。るサ秀で方の1以お号計断師。され病を断佛で方法ですけ人コモーエ

ZG 。たい用アリッチャーエニキモンセルセンサスするする事業調コミュキャコ8-8

果諾魏矯邸師ベトや(i

。专示习不很多

果語ゴノ誠実会親院師師響音るよご登舞てトモモモモア・ビトモモモアい用き拡大師時のへらの



(ゲインk=-8×10ºの場合)

ii)低次元化LQG制御試験結果

使用する際は 計した。 選択した ΡΖΤΝο. СЛ ゲイン行列は供試体からの放射音響パワーを最小にするよ Ņ のセンサ 低次元化 4 設計し ò 5 H H - 電道 マギ Г で測定される歪み量から供試体の振動状態を推定す Ø 51t(1, $\widehat{1}$ 5 Н G制御に LQG制御則は高次のため信号処理に時間の遅れを生じる。 1 次式) μ Y. 15 10 ∇ 1), ۶۲ つ用いて放射音パワーの軽減を試みた。 る音響制御試験では図1. Ŕ (1, ゲインと作成した状態推定器を用いて $\widehat{\mathbf{1}}$ 2 次式) 3), (3, に次数を落 1)の対称モ <u>н</u> $\widehat{}$ した低次元化し ω うに設計した。PZTNo. ア 14に示すようにセンサ る推定器を作成した。 を検知しやすいと考え 最適レギュレータ Г QG制御則を設 QG制御則を 実際に

用いた。

在をそ いて設計したためである。 の抑制量は少なくなった。 ۍ ۱ ວາ , ビイ 図 1.1.3 クの抑制量は向 れぞれ示す。 で低次元化L 1 μ ŀτ ゲイ 6 11 QG制御を適用した試験結果について説明する。 $(\neg$ ΡZ たが(2,3)、(3, ン制御の場合と比較し これは制御則が T 歪 センサNo.5、No. (1, \sim $\dot{}$ て振動数12 (3 , μ 3)の振動モー (1,7 で適定し 3)振動モー 5 H z 付近における た歪みの P ドの歪のピー \times يسر • ドに重みをお н • S ω 強め D 分 ク値 **----**

ベルのPS <u>ب</u> 2) 振動 千 d Bの軽減が可能であるこ 制御適用時の放射音の音圧 ω 17, D分布図をそれぞれ示す。 ド位置での音圧レ 図1. Γ. ω とが確認できた。ゲイン制御時の問題であった(1, ш レベルを図1. ∞ ベルはゲイン制御と比べ2 には測定位置 制御なしの場合 بب • (4, ω 4) 7に示すように計測した。 イ氏教つ 1 d B低くなった (2, 2) てピーク位置で1~ で計測した音圧レ 3),(2 図1. $\overline{}$

に示す。 軽減を確認した。 (1 供試体からの放射音響パワ とが確認でき (1, 1),ŝ (3, 0 2 1)モ сл 00Hzのオ ドなどで放射音響パワーを R 1/3オクター ーン À. -ブ分析し イでは0. 15 結果を図1. 7 d μ 0 d B 軽減し Bの放射音響パワー ب ω ている **,___** 9







図1. . . ω 1 È 9 放射音響パワー測定結果(1/3オ \mathcal{A} Y' 1 ブ分析結果

(低次元化LQG制御の場合)

(6) P N F 5 4 11 H Ŕ の要求値検討

困て 77 911 S 垘 適用す 印加電圧 制御坊 7 研究に 单 光 7 3 *5 7 渖 \cap A ĥ めた。 で調査 に法 武存 鲻 œ۴ Š 5 Ŕ $\{V_{max}\}$ 使用さ 邂 K \mathcal{T} Ъ 、バノマ、 F $\overline{}$ D N 7 実際に制御対 ただ バイ \subset ა ÎN $\overline{}$ Ĵ 25 要求 をを表 、液化す \subset 5 4 実機サイ 5 Ś Y H N Ъ 11 Ъ $\overline{}$ 調査 1.1.3μ 4 \mathbf{N} で使用さ N ズマ Ň Н Tの特性や Ŷ TOF 0 袌 ズの供試体 及び実機レベルの機内騒音軽減に した研究は正弦波による アクチュ \cap タへの要求値は供試体の形状 4 なな った れてい 5 2 îr, 4 めず μ パゴ Н 供試体 Н Ś 1 (年代)対象と メイ H1 Р タ能力について検討を行 ンズ Y 5 Ν で検討す 能力 4 4 E 159 ও アマ Н 用いた機内騒音軽減検討を クに変化 なっている供試体を表 1.1. (圧電歪定数 d 3 1、 憂音 S 必要があ ۲[′] タ能力について ш • 振動加振時の音響制御であ N4 吘 や実練フ Ъ Ъ ŝ Ľ N \mathbb{N} F ა H 11 θ μ 5 Y 弾性 検討を行 ベア 数量 ò 7 5 (1 なば 4 本研究 3 5 μ 樹 円 \cap 行 の適用を 围 Н Υļ ш 1置及び った。 Η ۲ 1 ა で使用 ω 最大 を実 ンズ イレ Ŕ ω RH

性能 愛い 体控 ŝ は必要であ E 1 11 9ţ ¥ Ħ S en の研究 電記 \sim 垘 定数 d 3 1、 S ž o σ い角 れる。 Ħ N 以上から少なく れているP 印加可能電圧V_{max}) Z Tは本研究で使用したC-Cer Cer 現状のC を有す Ъ ZTがデモン 91と同等以上の性能(弾 9 μ Ŕ と同じ程度の 7 $\overline{\nabla}$ Y 뀇

	C-91 (本研究)	G1195	Ai-8 (Aastra)	PC-5	BM400
弹性率E(N/m²)	5.9 × 10 ¹⁰	6. 3×10^{10}	8. 2×10^{10}	6. 3×10^{10}	8. 0×10^{10}
圧電歪定数d ₃₁ (m/V)	$330 imes 10^{-12}$	354×10^{-12}	105×10^{-12}	186×10^{-12}	115×10^{-12}
印加可能電圧 Vmax(V/mm)	270	N/A	N/A	500	400以上
PZT板厚1mmの場合 E×d ₃₁ ×Vmax(N/m)	5. 3×10^{3}	N/A	N/A	5. 9×10^{3}	3.7×10 ³ 以上

表1.1.3-2 各種PZT(圧電セラミック)の特性

表1.1.3-3 各種PΖΤ (圧電セラミック)の適用検討例

PZT	アクチュエータ形状及び数量	適用対象
BM400 ¹⁾	形状:25.4×25.4×6.35mm 数量:197個, 方式:素子	実機フルスケール De Havilland Dash-8 series 100 プロペラノイズ(0-140Hz)の軽減
Ai-8 ²⁾	形状:25.4×25.4×6.35mm 数量:197個,方式:素子	実機De Havilland Dash-8の胴体パネル(546× 127mm)1枚を対象。プロペラノイズ(0-300Hz)の軽減 の研究。
PC5 ³⁾	形状:20×30×0.5mm(フレーム上) :30×30×0.5mm(スキン上) 数量:80個,方式:素子	ATR42/72のモックアッフ゜胴体セクション長さ3.25m プロペラノイズ(0-300Hz)の軽減
G1195 ⁴⁾	形状:38.1×21×0.19mm 数量:1枚,方式:素子	スチール板 380×300×1.96mmを加振器で周波数域 0-500Hzで正弦加振。放射音の軽減を行う。
N/A	形状:50.8×12.7×0.51mm 数量:2個 方式:バイモルフ型	アルミ胴体模型(プロペラノイズの機内騒音) 形状:長さ1.25m,直径0.51m,板厚1.63mm

(7)まとめ

PZTのセンサ及びアクチュエータ機能を用いることにより委託研究の目標値で ある放射音響パワー30%軽減が可能であることを小型構造要素供試体を用いて確認 した。今後、デモンストレータ試験への適用及び実用化を目指して制御方法の検討を 行っていきたいと考えている。また他の研究を調査することによりPZTのアクチュ エータ能力に対する要求値を示した。

(8)成果-発表論文等

- [3-1]「機内騒音低減技術の開発」,第2回「知的材料・構造システム」シンポジウム、 平成12年12月
- [3-2] Sound and vibration control of CFRP panel by piezoelectric sensors and actuators, SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, 2001.3

参考文献

- 1) A. Grewal, L.Paval and D.G. Zimcik [Application of Feedforward and Feedback Structural Control for Aircraft Cabin Noise Reduction], AIAA-98-1979
- 2) A. Grewal, F.Nitzsche and D.G. Zimcik 「Active Control of Aircraft Cabin Noise Using Smart Structures」, AIAA-96-1274
- 3) A.Sollo, L. Lecce and V. Quaranta[[]Active Control on ATR Fuselage Moke-up by Piezoceramic Actuators], AIAA-98-2230
- 4) C.R.Fuller, C.H. Hansen and S.D. Snyder [Experiments on Active Control of Sound Radiation from a Panel Using a Piezoceramic Actuator], J of Sound and Vibration (1991), p179-190

1.1.4 梁構造の振動低減

(1) はじめに

本年度は、3年間の研究の最終年度であるので、最初の2年間の成果概要も加えて今 年度の内容を報告し、3年間の成果のまとめとする。

本研究では、軽量かつシンプルなアクティブ振動制御システムを実現するために、ス マート材料を用いたアクティブ・アダプティブ構造の研究開発を行った。

対象構造物:振動荷重を伝達する代表構造として梁構造物を制御対象とする。

・制御対象:強制加振された梁構造の固定部に伝わる振動を制御対象とする。

スマート材料を用いたアクチュエータおよびダンパを使用した振動のアクティブ制 御技術を確立することを、研究の最終目的とする。具体的には、構造技術実証供試体 を用いた制御技術確認試験により、制御時の供試体固定部に伝わる振動荷重を、制御 OFF時に比べ半分に減らすことが最終目標である。

(2) 昨年度までの成果のまとめ

i) 平成10年度成果(初年度)

a) 振動制御に用いるスマート材料の選定

圧電素子は応答性が十分ありかつ適応例が豊富であること、電気粘性流体(以下、ERF)は応答性が十分で他のスマート材料より密度が低くかつ構造の変形に柔軟に対応できるという理由から使用するスマート材料として圧電素子と ERF を選定した。特に、ERF には0次仕様を設定し、試作品 TXER-30を選定した。

b) 振動制御用スマート構造の構造様式決定

拘束層を母構造の上下面に持ち、拘束層と母構造の間に ERF を封入した構造様 式を選定した。^{1),2),3)}スマート構造のコンセプトを図 1.1.4-1 に示す。

図 1.1.4-1 に示す構造様式を採用した理由は、研究室レベルで用いられている ERF の封入技術を基に、拘束層および電極を含んだ ERF ユニットの製作技術を開 発できること、及び母材となる構造の製造技術に影響を与えることなく ERF ユニ ットを従来の接着技術で製造できるためである。



図 1.1.4-1 Concept of Smart Structure for Vibration Reduction c)振動試験用 ERF の仕様設定

ERF の基礎特性試験結果と数学モデルによる計算から、振動制御用 ERF の仕様 (1次)を設定した。 損失係数 η が 2kV/mm 状態下で 20Hz で 2.5以上であること。

・その他の特性が TX-ER30 と同等であること

ii) 平成11年度成果(2年度目)

a)梁構造の振動制御を効率良く行えるスマート構造の基本設計

基本設計を行ったスマート構造の試験片と構造要素供試体を図1.1.4-2に示す。 ERF にせん断変形を与えるために、剛性の高い層(以下、拘束層と呼ぶ)を梁 の外側に置き、梁との間に ERF を封入した。拘束層は高い剛性が要求されるため、 炭素繊維強化複合材(以下、CFRP)を用いた。この拘束層は電極も兼ねる。 ERF による制御効果をより大きくする目的で、拘束層の外側若しくは母材に圧電素子 を貼付する設計とした。

図1.1.4-1に示す構造様式を採用した。理由は、

- ① 研究室レベルで用いられている ERF の封入技術を利用できること
- ② 拘束層および電極を含んだ ERF ユニットの製作技術を開発できること、及び
- ③ 母材となる構造の製造技術に影響を与えることなく ERF ユニットを従来の 接着技術で製造できるためである。



🛛 🗵 1.1.4-2. Coupon Specimens and Structural Element Specimen

b) ERF 封入方法の検討

封入技術の検討の結果、下記を設定した。

- ERF を封入する前に、拘束層または電極となる 2 枚の CFRP 板間の 3 辺 をシリコンシーラントでシーリングする。
- ② 硬化後に残る1辺から注射器により ERF を注入。
- ③ 注入した1辺をシリコンシーラントによりシールする。

c)試験片及び構造要素供試体の振動特性試験

図 1.1.4-2 に示した構造要素供試体の振動特性試験を行い、振動減衰効果を確認した(図 1.1.4-3)。



平成10年度設定した仕様(1次)で製作した ERF を試験片に封入し、振動特 性試験を行なった。CFRP の板で ERF を挟んだ Coupon A に用いて、振動減衰特性 を評価した。

更に、Coupon B により複数の振動モードに対する振動減衰特性を取得した。 また、より実構造に近づけた構造要素試験供試体を製作し、ERF を構造要素に 適用した場合の振動減衰特性を取得した。これらの試験結果から、更に仕様変 更が必要であることが判明した。

d)動試験データを用いた解析による振動制御効果の評価

振動試験により得られたデータと変更後の仕様案を用いて、平成12年度に行う 構造要素供試体(800mm)の振動制御効果を解析により評価し図1.1.4-4に示すよ うに、効果の目途を得た。



電場強度	1次モード	2次モード
kV∕mm	4.8 Hz	33.3 Hz
0	150	4.3
2.0	100	1.5
低減率	33%	65%

図 1.1.4-4 解析結果

e)ERF 封入方法の検討

封入技術の特記項目を以下に述べる。

ERFを封入する前に、拘束層または電極となる2枚のCFRP板間の3辺をシリコンシーラントでシーリングしておき硬化後に残る1辺から注射器によりERFを注入した。

(3) 平成12年度成果(最終年度)

・アクティブ・アダプティブ構造の振動制御方法の構築

・供試体のスマート材料を用いた複合材料構造の振動特性試験及び振動制御 効果の確認

i)アクティブ・アダプティブ構造の振動制御方法の構築^{2),3),4),5),6),7),8),9),10),11)}

a) 数学モデル

図 1.1.4-2 中の試験片に対する振動方程式を構築した。振動方程式の構築に当たって使用したモデル、記号等を図 1.1.4-5 に示す。

方程式導出の詳細は A. 補遺(数学モデル詳細説明)参照。



図 1.1.4-5. Dimensions for modeling Coupon B 基礎となる振動方程式は(1)式である。.

$$(E_1I_1 + E_3I_3)\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - b(\frac{t_1}{2} + t_2 + \frac{t_3}{2})\frac{\partial \tau_2}{\partial x} + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = F(x,t)$$
(1) \overrightarrow{x}

数学モデルは一般座標系 q_nを用いて、(2)式で示される。

$$\ddot{q}_n + \left(\frac{A_n}{C_n} + \frac{B_n G_E}{C_n} + i \frac{B_n G_E \eta_E}{C_n}\right) q_n = F_n$$
(2) $\vec{\chi}$

b)シミュレーション結果

(2) 式を用いたシミュレーション計算結果を図 1.1.4-6,7 に示す。各振動モードを制 御するため、ERF に加える電圧の大きさと構造の振動に対する位相差を変化させる。



(Zero Phase Angle)

(Phase Angle: $\pi/2$)

図1.1.4-6は、構造振動と同位相の電圧をERFに加えた場合、図1.1.4-7は90度 の位相差とした場合の解析結果である。横軸はERFに加える電圧の周波数、縦軸は 電圧を加えない場合に対する固定端での荷重の低減率である。1次よりも2次モ ードの方が、また同位相よりも90度位相差を与えた方がより大きな減衰が得ら れているのがわかる。また、印加電圧の周波数によって1次モードと2次モード の低減率が異なる傾向を示しており、これは、ERFに与える印加電圧の周波数およ び位相差を変えることにより、個々の振動モードを或る範囲で制御できることを 示している。

なお、後述する試験データから推定した構造要素供試体の損失係数は、試験結果と良く一致しており本解析モデルの妥当性が確認された。(図1.1.4-8)



ii)スマート材料を用いた複合材料構造の振動特性試験及び振動制御効果の確認

平成12年度はより実構造に近い供試体として、長さを800mm、幅40mm、GFRP 梁の厚さ 5mm とした構造要素供試体を製作し振動試験を実施し、振動試験により構造の減衰特性を取得した。

a)試験供試体^{1),2),3)}

図 1.1.4-9 に構造要素供試体を示す。





3種類の試験供試体の特徴は以下の通り。

- ① 拘束層タイプ:平成 11 年度製作した構造要素供試体の拘束層と同じ。
- ② 拘束層+中央層タイプ: ERF 効果の向上を狙い、①に加え板厚中央に ERF 層 を追加した。

③ハイブリッドタイプ:①の拘束層タイプの上下ルート付近に ERF のせん断歪 みを増やすように PZT を貼付した。

以上の3種類の構造要素供試体は、

- 1次固有振動数をほぼ一致させた。
- 製造方法は昨年度と同様。

とした。昨年度の供試体に比べ、大きく複雑となったために、実用場合のシー リング技術、電場印加方法等の課題が明らかになった。 2次モードでは、約1600v/mmで損失係数が既に解析による推定値0.067とほ ぼ同等の0.060(図1.1.4-13参照)に達っしている。また、計測された振幅か ら、1次モード及び2次モードとも目標であった制御時振動荷重レベルの半減 を達成できることが分かった。







図 1.1.4-13 周波数応答

電圧制御試験

ERF に加える印加電圧の位相差をパラメトリックに変化させて、振動の低減 率を求めた。図 1.1.4-14 に試験結果を示す。試験は、梁を1次モードおよび2 次モードの振動数で強制振動させ、ERF に加える印加電圧の周波数は梁の振動 数に合せ位相のみをパラメトリックに変えて実施した 図 1.1.4-14 は、試験結 果と3.1.2の解析結果を合わせてプロットしている。解析結果から予測さ れたように、ERF に加える印加電圧の位相差を変えると、振動低減率に明らか な変化が見られる。試験は、梁の固有振動数で加振して実施した。ERF に加え る印加電圧の位相差により各振動モードの振動低減率を変化させることができ ることが分かった。



図 1.1.4-14. 電圧制御の場合の振動低減率

②拘束層+中央層タイプ構造要素供試体

ERF に加える交流電圧を昨年度までと同様に60Hz 一定として、ランダム加振時の伝達関数を取得した。この伝達関数より損失係数を求めた。図1.1.4-15に ERF 電場強度の損失係数に対する影響を、図1.1.4-16に周波数応答を示す。



図 1.1.4-15 電場強度-損失係数
 図 1.1.4-16 周波数応答
 損失係数は 0.1を超えており、図 1.1.4-12の拘束層のみの場合に比べて約 2
 倍のレベルを達成している。実構造適用時の減衰性能低下に対する対策として、
 ERF 層を増やすことにより減衰性能を確実に高められることが確認された。

③ハイブリッド型構造要素供試体

減衰性能を ERF 層を増やすことなく向上させる方策として、圧電素子(PZT) を加えたハイブリッド型スマート構造とした。PZT はルート端に貼付した。

ERF に加える交流電圧を昨年度までと同様に60Hz 一定として、ランダム加振時の伝達関数取得試験を実施した。しかしながら、ランダム加振開始後 ERF と PZT の双方に電圧を印加したところアンプ電流の増加が著しく、試験電圧に 到達できなかった。アンプ能力の限界のため、これ以上の試験は不可能であり、 止むを得ず本試験は中止とした。そもそも補助的役割を PZT に持たせた案であったハイブリッド型では、期待効果以上にコントロールパワーを要することが 分かったので、ERF3 層の供試体②案の方が効率的である。

e) スマート構造に関する考察

試験片および構造要素による振動特性試験を行うために、試験供試体を製作した。3年間の製作過程を通じて得られた、製造に関する課題、封入技術に関する 考察を以下にまとめる。

①製造に関する課題

今回製作した試験供試体には、従来と同様な製作方法を使用した。ERF を封入 する前に、拘束層または電極となる2枚のCFRP 板の3辺にシリコンシーラント で予め層を形成する方法、及び、層の形にシリコンシートを切り2枚のCFRP 板 で挟んで接着する方法の2種類の方法を試みた。

実構造に近い 500mm 程度以上の大きさの構造への適用には後者が適切である ことが判明した。

②封入技術

ERFの封入に当たっては、流体を空気混入無しに広範囲に入れ込む方法とERF の溶媒がリークしないシール材料の選定が大きな課題である。また、広範囲か っ大量生産には、オートクレーブ等で複合材料とシール材を同時に成形接着す ることが効率的であるため、硬化温度に耐えられるシール材料が必要となると 考えられる。

③考察

実構造に対しては ERF による振動制御を行うために、次のような課題が考えられる。

- ・ 一定の ERF 効果を得るため厚さを均一化
- ・ シーラントによる ERF 無効部分の減少
- ・ 拘束層および電極を含んだ ERF 層の多層化
- ・ より以上の減衰を得るためには電気粘性効果の優れた ERF の開発が必要
- iii)スマート材料要求仕様設定

3年間の研究により、当初の研究目標を満足できた。従って平成12年度に開発した ERF の仕様を要求仕様とした。

・ 電場強度 2kV/mm 及び 20Hz の加振周波数の条件下で、損失係数 η が 2.5 以上
 ・ 電気粘性効果が、TX-ER30(平成10年度開発)と同等以上

(4) スマート構造の総合評価

ERFのみのスマート構造で、構造要素レベルの十分な減衰性能が確認され、実構造へ 適用する場合に減衰性能を満足させるために ERF 積層数を増やす方策が有効であるこ とを検証できた。また制御方法の検討では、振動モード個別の制御が可能であること が分かった。

本振動荷重制御に必要なスマート材料に対する要求仕様を設定するために試験片お よび構造要素供試体を用いて振動特性試験を行い、特に ERF を振動制御に用いるスマ ート材料としての仕様を明らかにした。

3年間の研究の結果、ERFのみを用いたスマート構造でも振動制御は当初の目標を達成 し得る見通しを得た一方、スマート構造に対する技術的な課題等が明確になった。

本研究を行うに当たり、大阪市立大学福田研究室には ERF を封入した試験供試体の 製作および振動振動特性試験に関して、技術的支援を受けた。アクティブ・アダプテ ィブグループとスマートマニュファクチャリンググループの連携研究のひとつの成果 である。

A. 補遺(数学モデル詳細説明)_{2),3),4),5),6),7),8),9),10),11)}

i)数学モデル

a) 試験片の振動方程式

図 1.1.4.2 の中の試験片に対する振動方程式を導出する。振動方程式を構築するに当たって使用したモデル、記号等を図 1.1.4-17 に示す。



☑ 1.1.4-17. Dimensions for modeling Coupon B

回転の自由度に関する慣性力を無視すると、基礎となる振動方程式は次のよう になる。.

$$(E_1I_1 + E_3I_3)\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - b(\frac{t_1}{2} + t_2 + \frac{t_3}{2})\frac{\partial \tau_2}{\partial x} + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = F(x, t)$$
(1)

左辺第1項は構造の弾性項、第2項は ERF が存在することによる Dynamic stiffness と Dynamic damping の項、そして第3項は慣性項である。ERF のせん 断応力 τ_2 は、次のように表現できる。

$$\tau_2 = G^* \times \gamma(x, t) \tag{2}$$

式(2) を式(1)に代入すると、次式を得る。

$$\alpha \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \beta G^* \frac{\partial \gamma}{\partial x} + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = F(x, t)$$
(3)

ここで、 G^* は、Complex shear modulus であり、 α および β は次のように表現できる。

$$\boldsymbol{\alpha} = E_1 I_1 + E_3 I_3 \tag{4}$$

$$\beta = -b\left(\frac{t_1}{2} + t_2 + \frac{t_3}{2}\right)$$
(5)

試験片の曲げ変形分布は、一般化座標を用いると次式になる。

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} A \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} B \end{bmatrix} \mu$$

$$y = \begin{bmatrix} C \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} D \end{bmatrix} \mu$$
(6)

ERF のせん断歪分布が、曲げ変形分布を用いて次式で表されるとする。

$$\gamma(x,t) = \sum_{j=1}^{\infty} \Gamma_j(x) \cdot \frac{\partial W_j(x)}{\partial x} \cdot q_j(t)$$
(7)

式(6)および(7)を用いて、式(3)は次のように書き換えることができる。

$$\alpha \sum_{j=1}^{\infty} \left[\frac{\partial^4 W_j}{\partial x^4} \cdot q_j(t) \right] + \beta \cdot G^* \sum_{j=1}^{\infty} \left[\left\{ \frac{\partial \Gamma_j}{\partial x} \frac{\partial W_j}{\partial x} + \Gamma_j \frac{\partial^2 W_j}{\partial x^2} \right\} q_j(t) \right] + \rho A \sum_{j=1}^{\infty} \left[W_j \ddot{q}_j \right] = F(x,t)$$
(8)

式(8)の両辺に $W_n(x)$ を掛けて全長に渡り積分すると、次式を得る。

$$\ddot{q}_n + \left(\frac{A_n + B_n G^*}{C_n}\right) q_n = F_n \tag{9}$$

ここで、各記号は次の通り。

$$A_n = \alpha \int_0^l \frac{\partial^4 W_n}{\partial x^4} W_n dx \tag{10}$$

$$B_n = \beta \int_0^l \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \Gamma_n \frac{\partial W_n}{\partial x} \right\} W_n dx$$
(11)

$$C_n = \rho A \int_0^l W_n^2 dx \tag{12}$$

$$F_n = \int_0^l W_n F(x,t) dx \tag{13}$$

Complex shear modulus G^* は、ERF と封入に用いているシリコンラバーの損失 係数 η_E を用いると、次式となる。

$$G' = G_E(1 + i\eta_E) \tag{14}$$

式(9)は式(14)を用いると、次の様に表現できる。

$$\ddot{q}_n + \left(\frac{A_n}{C_n} + \frac{B_n G_E}{C_n} + i \frac{B_n G_E \eta_E}{C_n}\right) q_n = F_n$$
(15)

ここで、 A_n/C_n , B_nG_E/C_E , $B_nG_E\eta_E/C_n$ はそれぞれ、複合材料の歪エネルギ、

ERF とシリコンラバーの歪エネルギ、ERF とシリコンラバーにより消費されるエ ネルギを示す。

b) 構造要素供試体の振動方程式

構造要素供試体の振動方程式は、試験片の方程式中のαおよびβが異なるだけ である。記号等を、図1.1.4-18に示す。



🗵 1.1.4-18. Dimension for Modeling Structural Element Specimen

$$\ddot{q}_n + \left(\frac{A_n}{C_n} + \frac{B_n G_E}{C_n} + i \frac{B_n G_E \eta_E}{C_n}\right) q_n = F_n$$
(15)

ここで、下記 α および β を用いると A_n, B_n, C_n, G^*, F_n は式 (10) および式 (14) と同じである。

$$\alpha = E_1 I_1 + E_3 I_3 + E_5 I_5 \tag{16}$$

$$\beta = -b\left(\frac{t_1}{2} + t_2 + t_3 + t_4 + \frac{t_5}{2}\right) \tag{17}$$

c)パラメータ同定

前述した振動方程式中、 A_n, B_n, C_n は、梁の曲げ変形分布やERFのせん断歪分布 の関数である。また係数 G_E , η_E は、ある振動モードの振動特性を決定するモード 特性である。式(15)中、 $\frac{A_n}{C_n} + \frac{B_n G_E}{C_n}$ は計測された固有振動数から求められ、 また $\frac{B_n G_E \eta_E}{C_n}$ は $\frac{A_n}{C_n} + \frac{B_n G_E}{C_n}$ と試験データから求めた供試体の損失係数 $\eta_{specimen}$ から計算することができる。 A_n, B_n, C_n は梁の曲げ変形分布 w(x,t)およびERF のせん断歪分布 $\gamma(x,t)$ の関数であり、理論式や有限要素法の結果を用いて、式 (10), (11), (12)より計算できる。以上より、 A_n, B_n, C_n が一度分かれば G_E & η_E を決定できることが分かる。本研究では、有限要素法の計算結果を用いて、 A_n, B_n, C_n を決定した。

この解析モデルを、試験結果を用いて検証した。有限要素法結果から求まった A_n, B_n, C_n および試験片Bの振動特性結果から、 $G_E \& \eta_E c$ 同定する。次に、構造要 素供試体の $A_n, B_n, C_n c$ 同じく有限要素法から求め、同定された $G_E \& \eta_E c$ から構造要 素供試体の1次モード($f_1=6.9$ Hz)の損失係数 $\eta_{specimen}$ を推定した。結果を図 1.1.4-19に示す。試験片の試験データから同定した $G_E \& \eta_E c$ 用いて推定した構造 要素供試体の損失係数が、試験結果と良く一致しており本解析モデルの妥当性を 確認した。



 \boxtimes 1.1.4-19. Comparison between Measured and Estimated η

d)より大きな構造要素供試体の減衰特性の推定

本年度はより実構造に近づけた構造として、長さ800mmの構造要素供試体 を製作し振動試験を行った。試験の前に、上述した解析モデルにより構造要素供 試体の減衰特性を推定した。

昨年度の構造要素供試体の振動特性結果から、 $G_E \& \eta_E$ を同定し、800mm構造要素供試体の A_n, B_n, C_n を有限要素法から求めた上で、同定された $G_E \& \eta_E$ から構造要素供試体の損失係数 $\eta_{specimen}$ を推定した。その結果、損失係数は1次モードで0.84、2次モードで0.67と推定された。

e) ERF の電場強度を制御する場合の減衰特性

昨年度は、ERF に 60Hz の交流電圧を構造振動の位相とは無関係に与えた。交流 電圧を与えた理由は、直流では ERF の分極が進み時間が経つにつれ電気粘性効果 が減少するとの報告がされているからである。昨年度までの試験結果からは、60Hz 交流を与えるのみで試験を行った構造要素供試体レベルでは目標とする減衰レベ ルを実現できることが分かった。しかしながら、この方法は受動的な振動制御で ある。

振動問題はある特定の振動数、振動モードが対象になることが多い、そこで、 ERF によるアクティブな振動制御を行う目的として、各振動モードの個別制御を 取り上げる。ERF によりアクティブな振動制御を行うためには、各構造の振動モ ードを個別に制御可能かどうかが大きな焦点である。そこで、いかに解析モデル を用いたシュミレーションにより検討した結果を説明する。

①状態空間モデル

今年度に試験を行った800mm長さの構造要素供試体について、振動制御 を行うシステムの状態空間モデルを作成した。制御は1次と2次のモードを対 象とするが、4次以下のモードを解析モデルに組み込んだ。以下のように、制 御システム解析プログラム MATLAB の状態空間モデルを作成した。

$$\dot{x} = [A]x + [B]u$$

$$y = [C]x + [D]u$$
(18)

ここで、

x:state vector $\{\dot{q}_n, q_n\}$

u, y: the input and output vectors.

Matrix [A] は、 $F_{s} = \int W_{s}F(x,t)dx$ と G_{E} & η_{E} により表現される。

参考文献

- 1)大島信生:制御可能な拘束粘弾性層を有する複合材はりの振動特性に関する研究、 (1997)
- 2) B. Bhattacharya, J.A. Rongong, G.R. Tomlinson, "Vibration Suppression Performance of Piezoceramic and Magnetostrictive Materials in Constrainted Layer Damping", in Proceedings of SPIE Vol. 3672, pp242-250, March 1999
- 3)Seung-Bok Choi, Chae-Cheon Cheong, Yong-Kun Park, Vibration Control of Smart Flexible Structure using Electro-Rheological Fluids, Proc. of First Asian-Australasian Conference on Composite Materials(ACCM-1), October 1998, pp.617-1-617-4
- 4) N.D. Sims, R.Stanway, A.R. Johson, D.J. Peel, W.A. Bullough, "Feedback control of an electrorhelogical long-stroke vibration damper", in Proceedings of SPIE Vol. 3672, pp73-81, March 1999
- 5) N.D. Sims, R.Stanway, D.J. Peel, A.R. Johson, "Controllable viscous damping: an experimental study of an electrorhelogical long-stroke damper under proportional feedback control", Smart Mater. Struc., 8 1999
- 6) N.D. Sims, R. Stanway, A.R. Johnson, J.S. Yang, Vibration isolation using a magneto-rehologiccal damper in the squeze-flow mode, Proc. of SPIE Conference on Passive Damping and Isolation, March 1999, pp.520-8526.
- 7) M. Yalcintas, J.P. Coulter, Analytical Modeling of Electrorheological Material Based Adaptive Beam, Journal of Intelligent Material System and Structures, Vol.6, July 1995, pp.488-497
- 8) M. Yalcintas, J.P. Coulter, An Adaptive Model with Electrorheological Material Based Applications, Journal of Intelligent Material System and Structures, Vol.6, July 1995, pp.498-507
- 9)Fukuda T., Oshima N., Damping Control of a CFRP Cantilevered Beam with Electro-Rheological Fluid Actuator, Proc. Of 3rd International Conference on Intelligent Materials, 1996, pp.331-336
- 10)Oshima N., Matsusaka Y., and Fukuda T., Effect of Waeform and Frequency of

Elastic Fields on Vibration Response of an Electro-Rheological Fluid Based CFRP Cantilevered Beam, Memories of Faculty of Engineering, Osaka City University, 37, 1996, pp.1-7

- 11)Shigeru Machida, Yuji Matsuzaki, Toshiyuki Hagi, Vibration Control by Smart Structure with Electro-Rheological Fluid, SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, March 2001
- 12)Toshiyuki Hagi, Yuji Matsuzaki, Shigeru Machida, Experimental Evaluation of Smart Structure with Electro-Rheological Fluid, SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, March 2001

1.1.5 分布力学系制御技術の研究開発

(1) 研究開発の目的

i) 柔構造物における分布系の振動・形状の計測・制御法の確立

宇宙用柔構造物の分布系センサ・アクチュエータによる振動制御・準静的形状制御を目 標とする。分布センサ・アクチュエータをもつ構造物の形状・振動の計測・制御の問題点 を把握し、分布系の計測・制御法を確立する。

ii) 模擬構造物による実証

通信アンテナを想定した模擬構造物(柔アンテナ)を製作し、確立した構造設計法や計 測法・制御法を実証する。梁(リブ)を用いた骨組み構造を支持構造とし、そこにメッシ ュを張ってアンテナ反射面を模擬した面を構成する。骨組み構造上に、センサ、アクチュ エータを配置し、外乱の有無によらず、振動を最適に抑制し、準静的に形状を維持できる ことを実証する。

(2) 概要

宇宙用通信アンテナを柔構造にし、分布系センサ・分布アクチュエータを用いて柔構造 物の形状と振動を制御することで、精密なアンテナ反射面を形成すると共にアンテナの軽 量化を目標に研究を進めた。開発し設計製作した直径約 1m のアンテナの写真を図 1.1.5-1 に、概略の構造を図 1.1.5-2 に示す。アンテナは放射状に配置された 6 本の梁 (厚さ 1mm、 幅 40mm) と、この上にピンを介して張られた反射面 (直径 30µm のモリブテン線からな るメッシュ)で構成される。梁は自重で約 20mm たわむので、地上での実験のために重力 補償機構が設けられている。6本の梁の上下面のほぼ全面に厚さ 0.3mm の圧電セラミッ クス (PZT) と高分子圧電フィルム (PVDF) が接着されている。PZT と PVDF は梁の長 手方向に 2 分割されており、それぞれが独立に制御される。PZT に電圧をかけると梁はそ の先端で±12mm 変形するので、アンテナ反射面の形状を制御することができる。本報で は、梁の形状制御および外乱や形状制御時に発生する過渡振動の制御についての理論解析 と実験結果について記述する。



図 1.1.5-1 柔構造アンテナの外観写真



図 1.1.5-2 アンテナの構造模式図

(3) 梁の静的変形量の計算

実験に用いている梁の構造を図 1.1.5-3 に 示す。この梁において PZT に電圧 V_s を負荷 すると梁に生じるモーメント M_0 とたわみ yは

$$M_0 = bE_2(T_2^2 - T_1^2) \frac{d_{31}}{t_2} V_s = DV_s$$
 (1)

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M_0}{EI}, \quad y = \frac{M_0}{2EI} x^2$$
(2)





図 1.1.5-4 梁の静的変形量(計算値と実験値)

で表わせる¹⁾。ここで、b:梁の幅、 d_{31} : PZT の圧電定数、 t_2 : PZT の厚さ、EI:梁の等 価剛性である. 図 1.1.5-3 の M_1, M_2 に 100V の電圧をかけた場合について、梁の変形曲線 の計算値と実験値を図 1.1.5-4 示す。この結果から、梁は先端で最大±12mm 変形し、充分 な変形量が得られることがわかる。

(4) 梁の運動方程式を用いた振動の計算

ここで、アクチュエータに加える制御量を決めるために、梁の振動特性について理論的 に検討する。図 1.1.5-3 の梁の振動を考えた場合、自重補償器が付いた一端固定・他端自 由の梁振動とみなすことができる。自重補償器を考慮に入れた梁の自由振動の運動方程式 は次式となる。

$$\frac{\gamma s}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = -\left(\frac{b_1}{a_1}\right)^2 m_1 \ddot{y} \left(\frac{L}{2}\right) \delta\left(x - \frac{L}{2}\right) - \left(\frac{b_2}{a_2}\right)^2 m_2 \ddot{y}(L) \delta(x - L)$$
(1)

ここで、γ:複合梁の等価比重量、s:断面積、g:重力加速度、

EI: 複合梁の等価剛性、L: 梁の長さ、 $m_1, m_2:$ 自重補償器の重り、

 a_1, b_1, a_2, b_2 :自重補償器のてこ割合 である。

また、境界条件は、次式となる。

$$y(t,0) = \frac{\partial y(t,0)}{\partial x} = \frac{\partial^2 y(t,L)}{\partial x^2} = 0$$
(2)

偏微分方程式(1)を解くために、式(1)の右辺をゼロとした

$$\frac{\gamma}{g}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EI\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = 0$$
(3)

式(3)と境界条件(2)に対応する固有値問題を考える。固有値問題は、変数変数 y(t,x)を

$$y(t,x) = \sum_{i=1}^{\infty} Y_i(x)q(t)$$
(4)

と置くことで、モード展開することができる。よって、振動方程式とモード関数とは以下 のように得られる。

$$\cos \Lambda_i \cosh \Lambda_i = -1 \tag{5}$$

$$Y_{i}(x) = \sin\left(\Lambda_{i}\frac{x}{L}\right) - \sinh\left(\Lambda_{i}\frac{x}{L}\right) - a_{i}\left\{\cos\left(\Lambda_{i}\frac{x}{L}\right) - \cosh\left(\Lambda_{i}\frac{x}{L}\right)\right\}$$
(6)

係数 a_i、片持ち梁の固有振動数ω_i、振動方程式の根Λ_iの間には、次式の関係が成り立つ。

$$a_{i} = \frac{\sin\Lambda_{i} + \sinh\Lambda_{i}}{\cosh\Lambda_{i} + \cosh\Lambda_{i}} \qquad \Lambda_{i}^{4} = \frac{\gamma_{s}L^{4}\omega_{i}^{2}}{EIg}$$
(7)

よって、式(1)は、以下のように書くことができる。

$$\frac{\gamma s}{g}\ddot{q}_{i}\int_{0}^{L}Y_{i}^{2}dx + EI\left(\frac{\Lambda_{i}}{L}\right)^{4}q_{i}\int_{0}^{L}Y_{i}^{2}dx = -\left(\frac{b_{1}}{a_{1}}\right)^{2}m_{1}Y_{i}\left(\frac{L}{2}\right)\sum_{j=1}^{\infty}Y_{j}\left(\frac{L}{2}\right)\ddot{q}_{j} - \left(\frac{b_{2}}{a_{2}}\right)^{2}m_{2}Y_{i}(L)\sum_{j=1}^{\infty}Y_{j}(L)\ddot{q}_{j} \qquad (8)$$

また、PZT によって生じるモーメント
$$M_{01}$$
, M_{02} は、
 $M_{01}(t) = D_R u_1(t)$, $M_{02}(t) = D_R u_2(t)$

と表わされる¹⁾。ただし、 D_R はアルミ母材と圧電セラミックスの形状による係数であり、 u_1, u_2 はそれぞれ、図 1.1.5-3 に示される M_1, M_2 の PZT に負荷する電圧である。仮想仕事の原理を用いてモーメントを一般力(外力)として導入すると、

(9)

$$\frac{\mathscr{P}}{g}(\int_{0}^{L}Y_{i}^{2}dx)(\ddot{q}_{i}+\omega_{i}^{2}q_{i}) = -(\frac{b_{i}}{a_{i}})^{2}m_{i}Y_{i}(\frac{L}{2})\sum_{j}Y_{j}(\frac{L}{2})\ddot{q}_{j} - (\frac{b_{2}}{a_{2}})^{2}m_{2}Y_{i}(L)\sum_{j}Y_{j}(L)\ddot{q}_{j} + \int_{0}^{t_{i}L}\frac{d^{2}Y_{i}}{dx^{2}}dxD_{k}u_{1} + \int_{t_{i}}^{t_{2}}\frac{d^{2}Y_{i}}{dx^{2}}dxD_{k}u_{2}(10)$$

が得られる。この式から PZT に電圧を負荷した場合の梁の振動応答を求めることができる。

(5) PVDF の出力とチャージアンプの構成・モデル化

PVDFは歪を受けることによって電荷を生ずる圧電材料であるため、時間とともに放 電する。従って高速に変動する振動は測定できるが、静的な変形は放電とともにドリフト が生じて、測定が難しいと言われていた。ここでは、センサに生じた電荷を保持するよう にセンサアンプ回路を工夫することで、静的な変形(DC成分)からのデータ取得ができ るようにした。用いたセンサアンプ(チャージアンプ)回路を図1.1.5-5に示す。この構 造により、センサに生じた電荷が保持され、電荷に比例した電圧が出力端に得られるので、 静的な変形を含めた応答が測定できる。

ここで、PZT への入力に対して PVDF を出力 とするモデルを構築する。このチャージアン プを用いると、PVDF に生じるひずみ ε と出 力電圧 vの関係は PVDF の特性と回路のコン デンサの容量 C_R だけで決まり、式(11)で表わ すことができる²⁾。

$$v = \frac{be_{31}}{C_R} \int_0^L \varepsilon dx = \frac{be_{31}}{C_R} \int_0^L \eta \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dz$$

$$= \frac{be_{31} \eta}{C_R} \int_0^L \sum_{i=1}^\infty \frac{d^2 Y_i}{dx^2} q_i dx$$
(11)





ここで、 e_{31} は PVDF の電圧定数、 η は中性軸から PVDF までの距離である。図 1.1.5-3 のように梁の両面に PVDF を接着する場合は梁全体の高さ($2T_2$)となる。本実験機のように 2 分割されている場合は、次式と記述することができる。

 $y_{1} = \frac{be_{31}\eta}{C_{R}} \int_{0}^{l_{1}} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{d^{2}Y_{i}}{dx^{2}} q_{i} dx = \frac{be_{31}\eta}{C_{R}} \sum_{i=1}^{\infty} q_{i}\overline{\beta}_{i1}$ (12) $y_{2} = \frac{be_{31}\eta}{C_{R}} \int_{l_{1}}^{l_{2}} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{d^{2}Y_{i}}{dx^{2}} q_{i} dx = \frac{be_{31}\eta}{C_{R}} \sum_{i=1}^{\infty} q_{i}\overline{\beta}_{i2}$ (13)

ただし、 $\overline{\beta}_{i1}$, $\overline{\beta}_{i2}$ は以下のようになっている。

$$\overline{\beta}_{i1} = \int_0^{l_1} \frac{d^2 Y_i}{dx^2} dx , \quad \overline{\beta}_{i2} = \int_{l_1}^{l_2} \frac{d^2 Y_i}{dx^2} dx \tag{14}$$

ここで、方程式(10)を行列を用いて記述すると、次式で表わすことができる。

$$\mathbf{M}\mathbf{\ddot{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{F}\mathbf{u} \tag{15}$$

ただし、 $\mathbf{q} = [\mathbf{q}_1 \cdots \mathbf{q}_n]^T$, $\mathbf{u} = [\mathbf{u}_1 \cdots \mathbf{u}_2]^T$ である。圧電セラミックスへ負荷する電圧**u**を入 カ、PVDFの出力信号 y を出力としたシステムは、一般的な状態方程式で以下のように表 わすことができる。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_{p} \mathbf{x} + \mathbf{B}_{p} \mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}_{p} \mathbf{x} + \mathbf{D}_{p} \mathbf{u} \end{cases}$$
(16)
$$\not\sim \quad \boldsymbol{\chi} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}^{T} \ \dot{\mathbf{q}}^{T} \end{bmatrix}^{T}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_{1} \ y_{2} \end{bmatrix}^{T}, \quad \mathbf{A}_{p} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{p} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{F} \end{bmatrix},$$

$$C_{p} = \frac{be_{31}\eta}{C_{R}} \begin{bmatrix} \overline{\beta}_{11} & \sim & \overline{\beta}_{n1} & 0 & 0 & 0 \\ \overline{\beta}_{12} & \sim & \overline{\beta}_{n2} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D}_{p} = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 \\ 0 & d_{22} \end{bmatrix}$$

また、このシステムを伝達関数 $P(s)$ で表わすと、以下のようになっている
$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_{1} \\ y_{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11}(s) & P_{12}(s) \\ P_{21}(s) & P_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{1} \\ u_{2} \end{bmatrix} = \mathbf{P}(s)\mathbf{u}$$
(17)
$$\mathbf{P}(s) = \mathbf{D}_{p} + \mathbf{C}_{p}(s\mathbf{I} - \mathbf{A}_{p})^{-1} \mathbf{B}_{p}$$
(18)

(6) 梁の形状と振動の制御法

図 1.1.5-6 に示すように、PZT と PVDF を梁 の長手方向に $M_1 \ge M_2$ に 2 分割し、それぞれを 独立に制御する。梁の形状制御と過渡振動や外 乱抑制が目的であるので、 i)速度制御 (ダンピ ングの付与)および ii)位置決め制御 (PVDF の 目標出力電圧を与え、実電圧との偏差を積分し、 フィードバックを行なう)を行なう。

M₁ PVDF M₂ M₁ V₂ M₂ ▼ V_s PZ 制御器 V₁(t)

i) 速度制御

図 1.1.5-6 制御システム

$$\begin{split} \mathbf{M}_{1}, \mathbf{M}_{2} \mathcal{O} \text{ PZT} \sim \mathcal{O} \mathfrak{A} \mbox{in} \mbox{algma} \mathbf{E} \mbox{ } \mathbf{E} \ V_{1}, \ V_{2}, \mbox{ PVDF} \\ \mathcal{O} \mbox{ } \mathcal{D} \mbox{algma} \mathbf{D} \mbox{algma} \mathbf{E} \mbox{algma} \mathbf{E} \ \mathbf{V}_{1}, \ \mathbf{V}_{2}, \mbox{ } \mathbf{P} \mbox{UF} \\ \mathcal{O} \mbox{ } \mathcal{D} \mbox{algma} \mathbf{D} \mbox{algma} \mathbf{E} \ \mathbf{E} \ \mathbf{V}_{1}(1) \mbox{ } \mathbf{L} \mbox{ } \mathbf{V}_{1}, \ \mathbf{M}_{2} \mbox{ } \mathbf{E} \ \mathbf{E} \ \mathbf{V}_{1}(1) \mbox{ } \mathbf{U} \mbox$$

ii) 位置決め制御

が求まる。

ここではセンサである PVDF の目標出力電圧 v_1 , v_2 を与え、梁の変形量(曲率半径)を 制御する。ここで重要なことは、(a)定常偏差が生じないこと、(b)PZT に大きなモーメン トの発生を期待することは不可能であるので、制御系が梁に付加的な剛性を与えないこと、 である。目標電圧と実電圧の偏差をフィードバック(比例制御)する場合には、上記の(a), (b)の条件が満たされない。そこで、偏差の積分値をフィードバックし(積分制御)、さら に減衰力を与えるために速度制御を合わせて行なう。この場合の梁にかかるモーメントは $M_{01} = Dv_1(t) = D \left(K_{p1} \int_{0}^{t} (v_1(t) - m_1) dt - K_1 \frac{be_{31} \eta}{C_R} \sum_{j=1}^{s} \dot{q}_j \int_{0}^{t} \frac{d^2 Y_j}{dx^2} dx \right) M_{02} = D \left(K_{p2} \int_{2}^{t} (v_2(t) - m_2) dt - K_2 \frac{be_{31} \eta}{C_R} \sum_{j=1}^{s} \dot{q}_j \int_{0}^{t} \frac{d^2 Y_j}{dx^2} dx \right)$ (20)

(7) 振動制御・位置決め制御効果の検証(解析と実験の結果)

±25Vのステップ状電圧を M₁の PZT に加えた場合の梁の過渡応答を図 1.1.5-7 に示す。 (a)は PVDF の出力、(b)と(c)は梁の自由端変位をレーザ変位計で計測した実験値と理論値 である。梁は過渡振動で大きく振動するが、約 11 秒後に速度制御を行なうと梁の過渡振 動はほぼ消滅する。そして、最終的にその先端で±2.5mm たわむ。図 1.1.5-7 (a)と(b)また は(c)を比較すると、梁先端の変位は一定になるが、PVDF の出力の絶対値は時間と共に小 さくなる。これは高分子特有の応力弛緩によるものと考えられ、PVDF で静的ひずみを測









合の欠点となる。

Żź, は実験結果と良く一致している。 PVDFに応力弛緩が生じなければ、理論結果のように梁のたわみは一定になる。 徐々に変化する理由は、 よる振動に対しても十分な振動抑制効果がある事を意味する。 端の目標たわみ±2.5mm) 図 1.1.5-8 は位置決め制御の結果である。 M₁の PVDF の目標出力電圧 12 秒後に速度フィー PVDF の応力弛緩による出力減少を積分補償が補うためである。 ドバックを行なうと過渡振動は完全に消える。 を与えている。積分制御の場合は過渡振動が徐々に大きくなる 梁先端のたわみの実験値が 11 n-9 (1 $\overline{}$ て±0.25V(先 とは外乱に 理論結果

8 制御モデルの構築

エータ系について述べる。 以降では、 制御性能を検討・評価するため、 図 1.1.5-3 で長手方向に2分割した梁のうち、 つまり、式(17)で入力を u1、 構造・制御系のモデ 出力を y」とする系 ルの構築を行なった。 根元側M₁のセン Ť ٠ 簡単のため \mathcal{A} \mathcal{G} 4 μ



図 1.1.5-8 積分+ 積分だけの場合 2 (a)PVDF 出力、 (a),(b)実験結果、 積分+微分制御による位置制御)場合と積分+微分の場合 と積分+微分 (c)計算結果 (b)(c)梁の自由端の変位量

 $y_1 = P_{11}(s)u_1 \tag{21}$

である。この系に対して、3次の振動モードまで考慮したシミュレーションモデルを構築 した。図 1.1.5-9 にその周波数特性を示 す。太線でシミュレーションの応答を、 (9B) 細線で実験結果を表わしている。実験結 Gain -50 果を見ると、ゲインがピークを持ち、位 Exnerim -100 l 10 10 相が下がっている2.5Hzと60Hzにおいて Frequency (Hz) (degree) 共振を持つことが分かる。シミュレーシ 100 ョンモデルでも、この共振特性を表わす 0 و پی م م 100 – 100 ことができている。このモデルを用いて 10 10 10 10 次の制御シミュレーションを行なった。 Frequency (Hz)

(9) 振動抑制制御

振動を抑制するため、微分要素を用いた減衰付加を行なう。図 1.1.5-10 にこの制御系を示す。制御対象 $P_{11}(s)$ に施した補償器 $G_d(s)$ は、以下のようになっている。

 $L j [z z_{0} - \zeta v] \delta_{0}$ $G_{d}(s) = \frac{k_{d}s}{(s + w_{1})(s + w_{2})} - \frac{1}{s^{2} + 2\xi w_{3} + w_{3}^{2}} \qquad (22)$ $\mathbb{E} 1 1$

 $G_{d}(s) = \frac{w_{d}^{3}}{(s+w_{1})(s+w_{2})} \frac{1}{s^{2}+2\xi w_{3}+w_{3}^{2}}$ (22) ここで、 k_{d} ω_{1} , ω_{2} , ω_{3} , ξ は設計パラメータである。

この補償器は、第1項が微分特性を、第2項がローパス特性を表わしている。ローパス特性を持たせたのは、高次の振動モードが励起するのを防ぐためである。この補償器の周波数応答を図1.1.5-11に示す。太線でシミュレーションを、細線で実験結果を示している。



図 1.1.5-11 コントローラの周波数応答



図 1.1.5-12 速度制御時の PVDF 出力 のシミュレーション結果





 \mathbb{X} 1.1.5 - 13速度制御時の PVDF 出力の実験結果 図 1.1.5-14 速度制御時の変位量の実験 話手

みを測定する場合の欠点となる。 端変位の実験結果には現れていないことから、高分子特有の応力弛緩やセンサ接着層の粘 K 住等によ .- $\overline{}$ N ંતુ 41 Ľ 5 せた結果を図 1.1.5-12~14 に示す。図 1.1.5-12 に PVDF 出力のシミ (1 - 場合や 5-13 に PVDF 出力の実験結果を、図 1.1.5-14 に梁の先端変位を示す。 の制御器を適用し、PZT に電圧 25V ップ入力によって生じた過渡振動が 2sec 後には安定に収束し 図 1.1.5-13 において定常値が時間と共に小さくなっていく。 ა 1 て生じる PVDF のドリフト特性であると考えられる。 **細線に制御を施さない場合を示している。** (先端変位で約 1.5mm)を負荷するステップ応答 シミモレ これは PVDF で静的ひず ージョン、 ているこ ベル μ μ 7 1 大線で制御や崺 マーマ とが分かる。こ 実験結果共に Ý ш シンチン ш ソや先 × R

の結果を示す。 および図 1.1.5-16 に示す。 図 1.1.5-15 にシミュレーションの結果を、 図 1.1.5-16 に実験 次に、理論的解析するために、この制御系の閉ループを調べた。 大線で制御を施つた場合を、 **細線で制御を施さない場合を**示 その結果 194 している。 送 1. 1.5-15



いよ も分かる。 くなっ 11 μ ∇ ている。 今回、主共振を抱える制御のみ ベリン 主共振を拘え 実験結果共に、制御を施 ている (1 、夕落つ とから、 した ているが、 振動抑制の効果があ (1 ก กิ ᠲ N ৩ らに精度を必要 て第1番 б (1 目の共振に とが理論的に いやい ᇔ \checkmark Å

(ツミュフーション結果)

(実験結果)

(10) 位置決め制御

には、

у С

高次の振動を抑える必要がある

を考とえ

.られる

17 に示す。 位置決め制御をするため、 これは目標値と PVDF 出力との偏差を積分する 積分要素を用いた制御系を構築し 11 ていよ 5 ò その制御系を図 1.1.5-5 ш 標値追従を行な

- 151 --

うものである。また、外乱等による振動を抑制するため、微分要素を併せて用いる。制御 対象 $P_{11}(s)$ に対して施した積分要素 $G_i(s)$ は、以下で表わされる。

 $G_i(s) = \frac{k_i}{s} \frac{1}{s^2 + 2\xi w_3 + w_3^2}$ (23)

ここで、 k_i は設計パラメータである。第1項は積分要素を、第2項はローパス特性を表わしている。ローパス特性は微分要素のときと同じである。積分器の特性は実験と同じ特性にして、シミュレーションを行なった。また、微分要素 $G_d(s)$ は、図1.1.5-10の特性と同じものを用いた。PVDFの目標値を 0.25V(先端変位で約1.5mm)としてシミュレーション、ならびに実験を行なった結果を図1.1.5-18~20に示す。図1.1.5-18に PVDF 出力のシミュ



図 1.1.5-19 位置制御時の PVDF 出力の実験結果 図 1.1.5-20 位置制御時の変位量の実験結果

レーション結果を、図 1.1.5-19 に PVDF 出力の実験結果を、図 1.1.5-20 に先端変位の実験 結果を示す。太線で減衰付加した場合、細線が減衰付加しない場合を示している。減衰を 付加しない場合は、位置決め動作のため振動が発散してしまう。しかし、減衰を付加する ことにより、安定に目標値に追従することができる。ここで、図 1.1.5-20 の先端変位の実 験結果を見ると、目標値に追従せず、時間とともに大きくなっている。これは、図 1.1.5-13 に示したように PVDF 出力がドリフトで小さくなることに起因している。位置決め制 御系では PVDF 出力に追従するため PZT に更に電圧が加わる結果として、先端変位が大 きくなっていくと考えられる。

(11) SPIE でのアンテナ構造物の制御のビデオで上映および研究動向調査

Newport Beach で開かれた SPIE on Smart Structures and Materials で、RIMCOFの Exhibition として、本報告書で述べた当社の開発製作したアンテナ構造物の制御の模様を ビデオで上映した。構造物の動画であったため、かなり反響があった。

また、本学会で、情報収集および意見交換を行なった。気を引いたのは、SPIEの MEMS (Micro-)のセッションが来年から MEMS & NEMS (Nano-) と名称を変えるとのことで、 Nano Technology が強調されていたことである。SPIE での各種の発表をもとに、Smart Structure 研究の今後の展開で Smart Materials を使用したアプリケーションとして、H DD、MDE、医療機器等々の振動・形状制御があると考え、検討をすすめた。

(12) まとめ

本研究の解析および実験による検証により、以下の技術を確立した。

i) 分布力学系の制御法の開発

(分布力学系におけるアクティブ・アダプティブ制御システム技術の開発)

分布系センサ・アクチュエータを用いた構造や計測法・制御法を確立した。具体的には、 柔アンテナの構成要素である梁構造物に対して適正な制御手法を検討し、制御方式を決定 した。11年度まで、それぞれ別個に行なってきた分布系センサを用いた計測法と分布系ア クチュエータを用いた駆動法を統合し、分布系のセンサの信号を用いて、分布系のアクチ ュエータの駆動信号を作って、制御を行なう方法を確立した。また、将来の開発方向を調 査検討した。

ii) 計測の高精度化

センサ信号を使ってアクチュエータを駆動する制御を行なうため、計測をさらに高精度 化する必要性があり、これを検討実施した。

iii) 通信アンテナを想定した模擬構造物(柔アンテナ)の製作・実証

梁(リブ)を用いた骨組み構造を支持構造とし、そこにメッシュを張ってアンテナ反射 面を模擬した面を構成した柔アンテナを設計・製作し、これを用いて評価した。骨組み構 造上に、センサ、アクチュエータを配置し、外乱の有無によらず、振動を抑制し、準静的 に形状を維持できることを実証した。

参考文献

- 1) B. Agrawal and K. Treanor, "Shape control of a beam using piezoelectric actuators", Smart. Mater. Stuct. 8 (1999) 729-740
- 2) H. Irschik, M. Krommer and U. Picher, "Shaping of distributed piezoelectric sensors for flexural vibration of smart beam", Proc. SPIE, Vol. 3667 (1999) 418-426
- 3) 内田、長安、林、中村、高橋: 柔アンテナ構造物の分布系センサ・アクチュエータに よる振動制御・準静的制御、第2回「知的材料・構造システムシンポジウム」講演文集 (2000) p109-p112.

1.1.6 Development of high damping composites embedding Shape Memory Alloy

(1) Introduction

Shape Memory Alloys (SMA) show in some temperature range a pseudoelastic behaviour due to stressinduced phase transformation [3]. When the material is mechanically stressed, internal friction during the transformation leads to energy dissipation resulting in large stress-strain hysteresis loops. Moreover, Nickel Titanium (NiTi) SMA exhibits, in contrast to elastomer damping materials, high stiffness. Therefore, pseudoelastic SMA is a promising candidate for passive damping [6,7,8,9,11] of structural components. Particularly, passive damping enhancement by embedding SMA into a composite structure [10] may be of interest.

This report investigates passive damping by embedding pseudoelastic NiTi wires in glass-fibre reinforced plastics (GFRP). First, an analytical study of a simple system, a cantilever beam constrained by SMA wires, is conducted to study the thermomechanical behaviour of SMA wires as passive damping elements in an oscillating structure. Then, a series of dynamical tensile tests for SMA wires is presented predicting the potential damping enhancement for composites by embedding SMA wires. Further experimental data on dynamic tensile tests can be found in Schroeder [4]. Finally, GFRP with embedded SMA wires are investigated with respect to their passive damping enhancement.

(2) Analytical study

Target: An analytical study is conducted to investigate passive damping for structural components using SMA. Particularly, the thermomechanical behaviour of SMA wires [16,17,18] used as passive damping elements in an oscillating structure is studied, cp. Konstanzer et al [5]. For this purpose, the oscillating behaviour of a cantilever beam constrained by SMA wires pinned at the free end is considered as shown in Fig.1.

Approach: The stress-strain-temperature relation of the SMA wires is described by a phenomenological, thermomechanical model based on an energy concept proposed by Matsuzaki et al. [12,13]. Since the temperature of the SMA wires varies as the wires are loaded/unloaded [19], the heat balance has to be taken into account by considering the latent heat due to the phase transformation, the dissipated energy during transformation as well as the heat transfer with the surrounding environment [15]. The bending vibration of the cantilever beam structure is modelled based on the Euler-Bernoulli theory. Applying modal analysis, the equations of motion in modal space are obtained. The coupled SMA wire-beam system is investigated considering free vibration due to an initial deflection of the beam tip. The SMA wires are austenitic at room temperature and are exposed to prestrain ε_0 when the beam in undeflected.

Results: When the beam is initially deflected, the actual strain in wire 2 increases whereas in wire 1 it decreases, thus in Fig.3, the actual strain of wire 1 starts at 0%. Figure 2 shows the effect of the wire diameter d (corresponding to the SMA volume fraction) on the time response of the beam for quasiisothermal conditions ($h = 2 \cdot 10^5 W/m^2 K$). The vibration amplitude decreases almost linearly until 0.003m and the larger the wire diameter, the higher the damping. During the oscillation, the SMA wires undergo elastic loading, martensitic transformation, unloading, reverse transformation, and so on, see Fig.2. The described pseudoelastic stress-strain hysteresis loop is associated with energy dissipation and results in passive damping. As the vibration amplitude decreases, the hysteresis loops become smaller. This leads to spiral loops, which finally change into linear elastic loading/unloading paths resulting in a residual vibration of amplitudes below 0.003m where the phase transformations no longer occur.

Next we examine the effect of the heat transfer with the surrounding environment. Figure 4,5,6 show the time response of the beam tip, the stress-strain and the temperature-strain relation of wire 1, respectively, for quasi-adiabatic $(h = 2 \cdot 10^1 W/m^2 K)$, quasi-isothermal $(h = 2 \cdot 10^5 W/m^2 K)$ and intermediate conditions $(h = 2 \cdot 10^1 W/m^2 K)$. In the quasi-adiabatic case, the phase transformation process is fast, and the heat transfer with the environment is minor. Thus, the latent heat which is released during the
(exothermic) martensitic transformation yields self-heating of the SMA wires resulting in a monotonic increase of the temperature, see Fig.6. During the (endothermic) reverse transformation, self-cooling decreases again the temperature. Since energy is dissipated during the phase transformations, the temperature after one complete cycle is increased. Entering the residual vibration level, the phase transformations no longer occur and the temperature decreases slowly due to the heat transfer with the environment. Since the transformation stress increases when the temperature of the wires increases, the stress-strain hysteresis loops tend to be upward, see Fig.5.

In the quasi-isothermal case, the heat transfer with the environment is fast so that the latent heat is compensated quasi-instantaneously keeping the temperature of the wires constant.

In the intermediate case, shown in Fig.6, the temperature increases during the first half of the martensitic transformation. As the transformation slows down when the pivot point of the oscillation is approached, the temperature decreases again due to the heat transfer with the environment. During the reverse transformation, the temperature decreases below the surrounding temperature. This results in curved hysteresis loops, which increases the dissipated energy per cycle and thus increases the damping, as seen in Fig.4.



Figure 1. Cantilever beam constrained by SMA wires.



Figure 3. Stress-strain relation of wire 1 for various wire diameters.



Figure 2. Time response of the beam tip displacement for various wire diameters.



Figure 4. Time response of the beam tip displacement for various heat transfer coefficients.



Figure 5. Stress-strain relation of wire 1 for various heat transfer coefficients.



Figure 6. Temperature-strain relation of wire 1 for various heat transfer coefficients.

(3) Dynamic tensile tests

Target: The stress-strain-temperature relation of pseudoelastic SMA wires is investigated experimentally by a series of tensile tests approximating the conditions of SMA wires applied in dynamically loaded structures. The experimental data, which confirm and extend the results obtained by Schroeder [4], will be used to predict the potential damping enhancement of composites by embedding SMA wires.

Approach: Dynamic tensile tests for SMA wires are carried out with a servo-hydraulic tensile test machine operated in a stroke controlled mode. The measuring system consists of a load cell (based on strain gauge measurement), an internal stroke extensiometer, a laser displacement meter (also recording the stroke signal) and a thermal camera for distributed temperature measurement. Dynamic testing up to 20Hz could be realised.

As a measure of damping, the specific damping capacity SDC [1,4] is calculated from the experimental stress-strain hysteresis loop, as shown in Fig.7. The SDC ψ is defined as the ratio of specific dissipated

energy D and specific stored energy U of one complete stress-strain hysteresis loop [], i.e. $\psi = \frac{D}{U}$. For

linear-elastic materials the SDC corresponds to the logarithmic decrement [4].

Although the SDC describes completely the damping property of the SMA wires, a high SDC of the SMA wires does not simply imply high damping of composites with embedded SMA wires. Even when the SDC of the SMA wires is high, the damping of the SMA composites may be low if only an insufficient amount of energy is stored in the SMA wires. Thus, apart from high SDC, the SMA wires have also to store a considerable amount of energy, i.e. provide sufficient stiffness. In order to predict approximately the damping of SMA composites, a symmetric unconstrained layer configuration, as shown in Fig.8, is considered. Relating to a reference configuration of basic material only, the Young's Modulus E and the longitudinal SDC ψ_i under longitudinal loading as well as the flexural rigidity EI and the flexural SDC was not flex the flexural loading as well as the flexural rigidity EI and

the flexural SDC ψ_f under flexural loading are obtained as [2]

longitudinal:
$$\frac{E_l}{E_1} = \frac{E_1 \cdot (1 - V) + E_2 \cdot V}{E_1}$$
 $\psi_l = \frac{E_1 \cdot \psi_1 + E_2 \cdot \frac{V}{1 - V} \cdot \psi_2}{E_1 + \frac{V}{1 - V} \cdot E_2}$ (1)

flexural:

$$\frac{EI_{f}}{EI_{ref}} = \frac{1 + 0.25 \cdot e_{21} \cdot H_{21}^{3} + 3 \cdot e_{21} \cdot H_{21} \cdot (1 + 0.5 \cdot H_{21})^{2}}{1 + 3 \cdot H_{21}^{2} + 3 \cdot H_{21} + H_{21}^{3}}$$

$$\psi_f = \frac{D_1 + D_2}{U_1 + U_2} = \frac{EI_1 \cdot \psi_1 + EI_2 \cdot \psi_2}{EI_1 + EI_2}$$
(2)

where the subscript 1 denotes the basic material (e.g. GFRP) and the subscript 2 the damping material (e.g. SMA), furthermore $V = \frac{h_2}{h_1 + h_2}$, $e_{21} = \frac{E_2}{E_1}$ and $H_{21} = \frac{h_2}{h_1}$ with $E_1 = 34GPa$ and $\psi_1 = 0.02$ for unidirectional GERP with a class-fibre volume fraction of 0.5. The SMA volume fraction is V = 7% and

unidirectional GFRP with a glass-fibre volume fraction of 0.5. The SMA volume fraction is V = 7% and E_2 and ψ_2 are calculated from SMA wire tensile test data.

Results: Experimental results obtained for pseudoelastic NiTi wires of diameter d=0.15mm and d=0.75mm are partially presented and discussed in the following. More elementary experimental data can be found in Schroeder [4].

The effect of training on hysteresis subloops: Figure 9 shows first cycle quasi-static hysteresis subloops at various prestrain values p and strain amplitude 0.5% together with a full bounding hysteresis loop. As the slope of the loading/unloading paths decreases as the martensitic fraction increases, the subloops become thinner and thus the specific dissipated energy decreases as the prestrain increases. Further tests therefore focus on 2% prestrain. In Fig.10, hysteresis subloops at 2% prestrain and 0.5% strain amplitude are compared for three different conditions: quasi-static loading of untrained wires, quasi-static loading of trained wires (200 cycles between 0% and 6% at 1Hz), and dynamic loading of trained wires. With an increasing number of cycles a decrease of the transformation stress is observed which for loading is faster than for unloading, cp. [4]. Thus, the height of the hysteresis decreases whereas the width remains since the strain amplitude is prescribed. Although the SDC of the SMA wires increases (from 1.85 to 1.95) due to the training, see Fig.11, the SDC of the unconstrained layer configuration decreases (e.g. from 0.18 to 0.13 for flexural loading). This is due to the fact that the energy stored in the SMA wires should also store a considerable amount of energy.

The effect of dynamic loading: When dynamic loading (at 5Hz) is applied, the temperature of the SMA wire increases (by about 2K) during martensitic transformation and decreases (by about 2K) during reverse transformation (as recorded with the thermal camera). Thus, the transformation stress increases for martensitic and decreases for reverse transformation yielding a sickle shaped hysteresis loop. Compared to quasi-static loading, the flexural SDC may decrease by about 30% for dynamic loading at 5Hz.

Expected damping of SMA composites: Whereas the previous results are obtained with thick wires (d=0.75mm) to enable temperature measurement, thin wires (d=0.15), used as passive damping elements in the SMA composites discussed in Section (4), are investigated for various strain amplitudes at 2% prestrain and dynamic loading at 5Hz. Figure 12 shows the hysteresis subloops after N=100 cycles at various strain amplitudes. The corresponding SDC values are found in Fig.13 and the normalized modulus and the flexural rigidity as defined by Eqs. (1) and (2) are given in Fig.14. Under flexural loading at 0.5% strain amplitude, the SDC of the unconstrained layer configuration with 7% SMA volume fraction is expected to increase from 0.02 (for the GFRP reference configuration) to 0.077, corresponding to an increase of damping by a factor of almost 4. On the other hand, the normalized modulus and flexural rigidity remain almost unchanged with respect to the reference configuration of Fig.8. This results from the fact that the Young's Modulus of the basic material (GFRP) and the damping material (SMA) are similar, which yields the advantage of avoiding high shear stress.

Fatigue behaviour: Although the fatigue behaviour of SMA wires embedded into a composite structure will be certainly different from the fatigue behaviour of unconstrained wires, tensile tests up to high number of cycles have been conducted with unconstrained wires (d=0.75mm) at 2% prestrain and dynamic loading at 5Hz. Figure 15 shows the obtained SDC as a function of the strain amplitude and the

One of the most important results is that passive damping enhancement for composites by embedding pseudoelastic NiTi wires is proofed to occur due to the stress-induced phase transformation. Moreover, an increase in passive damping has been achieved by a factor of 3.

Concerning further improvement, it has to be noted that: first, the initial damping of the reference composites without SMA wires seem to be high due to imperfect manufacturing; second, the SMA volume fraction was restricted to 7% only; third, exclusively NiTi wires have been investigated.

Relaxing these restrictions, it is expected to be possible to achieve passive damping enhancement for GFRP at strain amplitudes around 0.3% by a factor of 10.

However, the fatigue behaviour of SMA composites should be investigated as well as the damping properties within the temperature range relevant for aerospace applications. Moreover, a wide range of alloys has to be considered.

Regarding possible applications, vibration problems where unstable vibrations are required to be bounded seem to be interesting, since the damping of SMA composites increases with increasing strain amplitude. In helicopter rotor applications, the prestrain required to ensure the stress-induced phase transformation might be naturally applied by the use of the high centrifugal loads acting at the blade root. Moreover, high dynamic strain amplitudes occur in flexible rotor blades.

References

- 1. Lazan, B. 1968. "Damping of Materials and Members in Structural Mechanics", Pergamon Press Inc., Great Britain.
- 2. Mead, J.D. 2000. "Passive Vibration Control", John Wiley & Sons.
- 3. Otsuka, K., Wayman, C.M. 1998. "Shape Memory Materials", Cambridge University Press.
- 4. Schroeder, B. 1999. "Damping Properties of Pseudoelastic NiTi-Wires," NEDO Report FY1999.
- 5. Boller, C., Konstanzer, P., Matsuzaki, Y., Ikeda, T. 2000. "Damping with Shape Memory Alloys for Structural Systems," Proceed. 11th Int'l Conference on Adaptive Structures and Technologies.
- 6. Scherrer, P. et al. 1999. "Passive Vibration Damping in an Alpine Ski by Integration of Shape Memory Alloys," J. Phys. IV France, 9, pp.Pr9-393-Pr9-400.
- 7. Fosdick, R., Ketema, Y. 1998. "Shape Memory Alloys for Passive Vibration Damping, " J. of Intelligent Material Systems and Structures, 9, pp.854-870.
- 8. Gandhi, F. and Wolons, D. 1999. "Characterization of the Pseudoelastic Damping Behavior of Shape Memory Alloy Wires using Complex Modulus," *Smart Materials and Structures*, **8**, pp. 49-56.
- 9. Gandhi F., Wolons D. and Malovrh B. 1998. "An Experimental Investigation of the Pseudoelastic Hysteresis Damping Characteristics of Nickel Titanium Shape Memory Alloy Wires, " AIAA-98-2036.
- 10. Baburaj, V. and Matsuzaki, Y. 1996. "Material Damping Analysis of Smart Hybrid Composite Laminated Plate Structures, "J. of Intelligent Material Systems and Structures, 7, pp.427-432.
- 11. Thomson, P. et al. 1995. "The Use of Shape Memory Alloys for Passive Structural Damping," Smart Materials and Structures, 4, pp. 36-42a.
- 12. Kamita, T. and Matsuzaki, Y. 1996. "Pseudoelastic Theory of Shape Memory Alloys," Proceed. of SPIE's 1996 Symposium on Smart Structures and Materials, 2717, pp. 509-516.
- 13. Kamita, T. and Matsuzaki, Y. 1998. "One-Dimensional Pseudoelastic Theory of Shape Memory Alloys," Smart Materials and Structures, 7, pp. 489-495.
- 14. Matsuzaki, Y., Kamita, T., and Yamamoto, T. 1998. "Vibration Characteristics of Shape Memory Alloys," Proceed. of SPIE's 1998 Symposium on Smart Structures and Materials, 3329, pp. 562-569.
- 15. Matsuzaki, Y., Naito, H., and Ikeda, T. 1999. "Pseudoelastic Thermal Behavior of Shape Memory Alloys," *Proceed. of 10th International Conference on Adaptive Structures and Technologies*, pp. 208-214.
- 16. Seelecke, S. et al. 2000. "The Role of Thermomechanical Coupling in the Dynamic Behavior of Shape Memory Alloys," Proceed. Of the IUTAM Symposium Smart Structures and Structronic Systems.
- 17. Shaw, J.A., Kyriakides, S. 1995. "Thermomechanical Aspects of NiTi," J. Mech. Phys. Solids, 43, 8, pp.1243-1281.
- 18. Shaw, J.A., Kyriakides, S. 1997. "On the Nucleation and Propagation of Phase Transformation Fronts in a NiTi Alloy," *Acta Mater.*, **45**, 2, pp.683-700.
- 19. McCormick P.G., Liu Y. and Miyazaki S. 1993. "Intrinsic Thermal-Mechanical Behaviour Associated with the Stress-Induced Martensitic Transformation in NiTi," *Materials Science and Engineering*, A167, pp.51-56.

1.1.7 スマート・ストラクチャの静粛化に関する研究

(1). はじめに

分布定数系構造物の振動制御においては、構造物が固有に持つ無数の振動モードのため、制御要素 として導入される集中センサー/アクチュエータの使用により、観測/制御スピルオーバ⁽¹⁾が惹起さ れ、制御系の安定性が著しく損われる。その対策としてこれまでにも種々の手法^{(2)~(4)}が提案されてい るが、それらを総括すると、基本的にはフィルタリングを基調として、限られた周波数帯域で少数の 振動モードの抑制を指向する振動制御法であると言える。これに対して、分布定数系構造物の有する 全てのモードにダンピングを付与し得る唯一の手法が、コロケーションを基調とする DVFB⁽⁵⁾(Direct Velocity Feedback) 法であり、いかなる対象構造物であっても無条件にフィードバック制御系を安定 化できるという特徴を有している。しかしながら、本手法が LAC⁽⁶⁾(Low Authority Control) として認 知されるように、精緻な制御はできず、その効果も十分ではない。

著者らはこれまでに、LACとHAC (High Authority Control)の中間、MAC (Middle Authority Control) に位置づけされるクラスター制御法(ハー(II)を提案し、その正当性を立証すると共に、DVFB が 本手法の特別なケースであることを明らかにした。クラスター制御法は、分布定数系構造物に存在す る無限個の振動モードを、共通した属性を有する有限個のクラスターに弁別し、各々のクラスターに 帰属する全ての振動モード群を、簡素な制御手法により効果的に抑制することができる。しかしなが ら、これまで報告してきたクラスター制御法は、その基本となるクラスターフィルタリングを適用す るに当り、集中センサーの使用をその基礎としてきたため、センサー設置個所が周波数上限を制約し てしまうという難点があった。

そこで、本報告は「分布定数系構造物には分布定数系センサーを」と言うセオリーに戻り、分布定 数系センサーを基調とするスマート・クラスターフィルタリング法について明らかにする。ここで提 案するクラスターフィルタリング法は、分布定数系構造物に無数に存在する全ての振動モードに対処 できるフィルタリング法である。

本報告は、分布定数系薄肉矩形平板を対象とするスマートクラスターセンサーについて明らかにし、 その具体的な展開に当たっては、これまでの関連論文で取り上げた単純支持矩形平板を Test vehicle と して議論を展開する。まず、本論文は、クラスターフィルタリングを適用し得る条件を示した後、集 中センサーをベースとするクラスターフィルタリングの問題点を

明らかにする。次に、分布定数系センサーである PVDF フィルム を基調とするスマート・クラスターセンサーを提案し、当該セン サーの形状関数を提示する。さらに、周辺単純支持平板を具体例 としてセンサー出力の展開を図り、その結果センサー出力は既知 関数であるフレネル積分により容易に記述できることを示す。ま た、形状関数のディメンジョンならびに PVDF フィルムの貼付方 向とクラスタリング結果との相関について考察を進めた後に、実 験によりスマートクラスターセンサーの有意性を検証する。

(2). スマートクラスターセンサー

 (2.1) クラスターフィルタリングの導入 非減衰薄肉矩
 ・形平板の基礎式として、領域D(L_x×L_y)(図1参照)においてつ ぎの偏微分方程式を考える。

 $\mathbf{L}[\mathbf{w}(\mathbf{r},t)] + \mathbf{m}(\mathbf{r})\ddot{\mathbf{w}}(\mathbf{r},t) = \mathbf{f}(\mathbf{r},t)$

ただし、**r**は構造物の任意点における座標(x,y)、w(**r**,t)および



図1 平板の座標系

(1)

 $w(\mathbf{r},t)$ は \mathbf{r} における振動変位および加速度、 $m(\mathbf{r})$ は質量密度、 $f(\mathbf{r},t)$ は分布制御力、Lは自己随伴微分 演算子を表す。すると、 $w(\mathbf{r},t)$ および $f(\mathbf{r},t)$ はモード関数 $\varphi_k(\mathbf{r})$ (k = 1,2,3 · · ·)を基本関数として、以 下のように記述することができる。

$$\mathbf{w}(\mathbf{r}) = \sum_{k=1}^{\infty} \phi_k(\mathbf{r}) \mathbf{w}_k$$
(2)

$$f(\mathbf{r}) = \sum_{k=1}^{\infty} m(\mathbf{r}) \ \phi_k(\mathbf{r}) \ f_k$$

ただし

$$w(\mathbf{r}, t) = w(\mathbf{r}) e^{j\omega t}$$

(4)

ſ

 $f(\mathbf{r}, t) = f(\mathbf{r}) e^{j\omega t}$ (5)

さらに自己随伴微分演算子Lの特性としてモード関数の直交性が 成立し、これは次のように正規化することができる。

$$\int_{D} \boldsymbol{\phi}_{r}(\mathbf{r}) \mathbf{L}[\boldsymbol{\phi}_{s}(\mathbf{r})] d\mathbf{r} = \boldsymbol{\omega}_{r}^{2} \boldsymbol{\delta}_{rs}$$
(6)
$$\int_{D} \boldsymbol{\phi}_{r}(\mathbf{r}) \mathbf{m}(\mathbf{r}) \, \boldsymbol{\phi}_{s}(\mathbf{r}) \, d\mathbf{r} = \boldsymbol{\delta}_{rs}$$
(7)

ここで ω_r はr次のモード周波数、 δ_{rs} はクロネッカーデルタを表す。

さて、クラスターフィルタリング法の導入に当り、モード関数 $\varphi_k(\mathbf{r})$ ($\mathbf{k} = 1, 2, 3 \cdots$) は次式を満たすような、対称または歪対称 関数であるとする。すなわち、

$$\begin{aligned} \left| \phi_{k}(\mathbf{r}_{1}) \right| &= \left| \phi_{k}(\mathbf{r}_{2}) \right| &= \left| \phi_{k}(\mathbf{r}_{3}) \right| &= \left| \phi_{k}(\mathbf{r}_{4}) \right| \end{aligned} \tag{8} \\ \not \uparrow_{z} \not \uparrow_{z}^{z} \cup , \\ \mathbf{r}_{1} &= (x_{1}, y_{1}) \end{aligned} \tag{9} \\ \mathbf{r}_{2} &= (\mathbf{L}_{x} - x_{1}, y_{1}) \end{aligned} \tag{10} \\ \mathbf{r}_{3} &= (\mathbf{L}_{x} - x_{1}, \mathbf{L}_{y} - y_{1}) \end{aligned} \tag{11} \\ \mathbf{r}_{4} &= (x_{1}, \mathbf{L}_{y} - y_{1}) \end{aligned} \tag{12}$$

ただし

$$x_1 < < L_x, y_1 < < L_y$$

これまでのクラスターフィルタリングに関する報告^{の、(11)}におい ては、その実現を集中センサーに依拠していたため、ノーダルラ インがセンサー設置個所ないしはその近傍を通過する場合、セン サー出力がゼロないしは著しく低下してしまうという難点があっ



(3)

図2 スマートクラスターセンサー の形状関数

(13)

た。この傾向は高次モードになるほど顕著となり、クラスターフィルタリングが分布定数系構造物に 存する全てのモードを対象とする狙いに反する結果となる。そこで次節に記す分布定数系センサーを ベースとするクラスターセンサーを提案することにより、全てのモードを瑕疵なくクラスタリングで きることを示す。

(2.2) スマート・クラスターセンサー 図2に示すように、形状関数Ψ(x) でシェーピングさ れた2次元 PVDF フィルムが、矩形平板左下に貼付されているとする。すると、この場合のセンサー 出力 q は次式のように表される。

$$q = \int_{0}^{x_{0}} dx \int_{0}^{\psi(x)} \Gamma_{0} \left\{ e_{31} \frac{\partial^{2} w(\mathbf{r})}{\partial x^{2}} + e_{32} \frac{\partial^{2} w(\mathbf{r})}{\partial y^{2}} \right\} dy$$
(14)

ただし e_{31} および e_{32} は圧電応力定数、 Γ_0 はセンサー定数を表す。

スマートセンサーとは、信号処理機能を内蔵するセンサーを指し、分布定数系センサーを導入する ことでこれを実現することができることは既に報告⁽¹²⁾した。本論文は分布定数系センサーである PVDFフィルムを用いたクラスターセンサーを開発することから、これをスマート・クラスターセン サーと呼ぶことにする。

いま対象としている矩形平板のモード関数は(m,n)モードのとして表記され、平板上にmn個発現する ノーダルエリアは、x軸およびy軸に平行して走るノーダルラインにより分割され、その形状も矩形 となる。したがって、形状関数の具備すべき点は、いかなるノーダルラインが形状関数上を過ろうと も、式(14)に記述されるセンサー出力がゼロとならないように形状を決定する必要がある。例えば、図 2(a),(b)に示すように、形状関数が長方形ないしは直角三角形の場合、これらの分布センサー内を、 破線に示されるようなノーダルラインが過る時、ノーダルエリア隣接間における逆位相特性のため、 センサー出力はゼロとなる。これに対して、図2(c)に示すような2次関数でシェーピングされた形状 関数の場合、ノーダルラインがどのように通過しようとも、センサー出力はゼロとはならない。そこ で、形状関数を2次関数以上の高次関数で置換すれば、センサーとしての機能を保有できることが分 かる。したがって、当該センサーの要求に適う形状関数は無数に存在するが、その中で最も単純な形 状関数が2次関数であると考え、本論文では次式を形状関数として使用することにする。

$$\Psi(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{y}_0}{\mathbf{x}_0^2} \left(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0\right)^2 \tag{15}$$

(2.3) スマート・クラスターセンサー出力

Sensor 1の出力q₁ 式(15)で記述される形状関数でシェーピングされたセンサー(これを Sensor 1と呼ぶ)が、スマート・クラスターセンサーとしての機能を有するのか否かを検証するためには、式 (14)の展開を図る必要がある。そこで、ここでは振動解析解の得られている周辺単純支持矩形平板を具 体例に、Sensor 1の出力q₁の解析解を導出する。

まず、単純支持平板の振動モード関数φ_k(**r**)(k=1,2,3····)は次式のように表される。

$\varphi_k(\mathbf{r}) = \sin \alpha_k x \sin \beta_k y$. (16)
ただし	
m, π n, π	

$$\alpha_{k} = \frac{m_{k}\pi}{L_{x}}, \quad \beta_{k} = \frac{n_{k}\pi}{L_{y}}$$
(17)

ここで、 m_k 、 n_k はモード指数を表す。 式(2)、(16)を式(14)に代入し整理すると次式を得る。

$$q_{1} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_{k}}{2\beta_{k}} \int_{0}^{x_{0}} \left[\sin \left\{ \alpha_{k} x + \beta_{k} \psi(x) \right\} - \sin \left\{ \alpha_{k} x - \beta_{k} \psi(x) \right\} - \frac{\beta_{k}}{a_{k}} \sin \alpha_{k} x \right] dx$$
(18)

ただし

$$a_{k} = \mathbf{w}_{k} \Gamma_{0} \left(\mathbf{e}_{31} \boldsymbol{\alpha}_{k}^{2} + \mathbf{e}_{32} \boldsymbol{\beta}_{k}^{2} \right)$$
⁽¹⁹⁾

式(18)に式(16)を代入し展開すると、式(18)の被積分項の内、第1項q_{k11}は

$$q_{k+1} = \int_{0}^{x_{0}} \sin\left\{\frac{\beta_{k} y_{0}}{x_{0}^{2}} x^{2} + \left(\alpha_{k} - \frac{\beta_{k} y_{0}}{x_{0}^{2}}\right) x + \beta_{k} y_{0}\right\} dx$$
(20)

第2項q_{k12}は

$$q_{k12} = -\int_{0}^{x_{0}} \sin\left\{\frac{\beta_{k} y_{0}}{x_{0}^{2}} x^{2} - \left(\alpha_{k} + \frac{\beta_{k} y_{0}}{x_{0}^{2}}\right) x + \beta_{k} y_{0}\right\} dx$$
(21)

第3項q_{k13}は

$$q_{k13} = \frac{\beta_k}{a_k \alpha_k} \left(\cos \beta_k x_0 - 1 \right)$$
(22)

.

さらに式(20)はフルネルの公式⁽¹³⁾により、次式のように記述できる。 $q_{k+1} =$

$$\sqrt{\frac{\pi}{2A_{k}}} \left[\cos \frac{A_{k}C_{k1} - B_{k1}^{2}}{A_{k}} \left\{ S\left(\frac{A_{k}x_{0} + B_{k1}}{\sqrt{A_{k}}}\right) - S\left(\frac{B_{k1}}{\sqrt{A_{k}}}\right) \right\} + \sin \frac{A_{k}C_{k1} - B_{k1}^{2}}{A_{k}} \left\{ C\left(\frac{A_{k}x_{0} + B_{k1}}{\sqrt{A_{k}}}\right) - C\left(\frac{B_{k1}}{\sqrt{A_{k}}}\right) \right\} \right]$$

$$(23)$$

ただし

$$A_k = \frac{\beta_k y_0}{x_0^2} \tag{24}$$

$$\mathbf{B}_{k1} = \frac{1}{2} \left(\alpha_k - \frac{2 \beta_k \mathbf{y}_0}{\mathbf{x}_0} \right)$$
(25)

$$C_{kl} = \beta_k y_0 \tag{26}$$

また、式(23)の右辺にあるS(x)およびC(x)は、各々フレネル正弦積分およびフレネル余弦積分を表 し、次のように定義される。

$$S(\mathbf{x}) = \int_{0}^{\mathbf{x}} \sin\left(\frac{\pi}{2} u^{2}\right) d\mathbf{u}$$
(27)
$$C(\mathbf{x}) = \int_{0}^{\mathbf{x}} \cos\left(\frac{\pi}{2} u^{2}\right) d\mathbf{u}$$
(28)

同様に、式(21)もフレネル積分を用い、次式のように記述される。 $q_{k+2} =$

$$-\sqrt{\frac{\pi}{2A_{k}}}\left[\cos\frac{A_{k}C_{k2}-\tilde{B}_{k1}^{2}}{A_{k}}\left\{S\left(\frac{A_{k}x_{0}+\tilde{B}_{k1}}{\sqrt{A_{k}}}\right)-S\left(\frac{\tilde{B}_{k1}}{\sqrt{A_{k}}}\right)\right\}$$
$$+\sin\frac{A_{k}C_{k2}-\tilde{B}_{k1}^{2}}{A_{k}}\left\{C\left(\frac{A_{k}x_{0}+\tilde{B}_{k1}}{\sqrt{A_{k}}}\right)-C\left(\frac{\tilde{B}_{k1}}{\sqrt{A_{k}}}\right)\right\}\right]$$
$$(29)$$

ただし

$$\widetilde{B}_{k1} = -\frac{1}{2} \left(\alpha_k + \frac{2 \beta_k y_0}{x_0} \right)$$
(30)

式(20)、(23)、(29)を式(18)に代入することにより、Sensor 1の出力q」は次式となる。

$$q_{1} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_{k}}{2\beta_{k}} \left(q_{k+1} + q_{k+2} + q_{k+3} \right)$$
(31)

平板右下、右上、左上に設置したセンサー(Sensor 2, Sensor 3, Sensor 4と呼ぶ)の出力q₂, q₃, q₄ も、形状関数を以下のように置くことで、これまでと全く同様の手順で導出できるので、具体的な展 開は割愛し、結果のみを記すことにする。

$$\psi_{2}(x) = \psi(L_{x} - x)$$
(32)

$$\psi_{3}(x) = L_{y} - \psi(L_{x} - x)$$
(33)

$$\psi_{4}(x) = L_{y} - \psi(x)$$
(34)

Sensor 2,3,4の出力q2, q3, q4 に関しても、全く同様の手順により導出することができるが、ここでは紙 面の都合上割愛する。

(2.4) クラスターフィルタリング (2.3)節で得られたセンサー出力を用いて、矩形平板に発現 する全モード関数を4種類のクラスターに分割することができる。すなわち、クラスターが固有に持 つ属性を利用することにより、奇/奇モードクラスターは

$q_{odd / odd} = q_1 + q_2 + q_3 + q_4$	(35)
奇/偶モードクラスターは	
$q_{odd / even} = q_1 + q_2 - q_3 - q_4$	(36)

偶/奇モードクラスターは	
$q_{\text{even /odd}} = q_1 - q_2 - q_3 + q_4$	(37)
偶/偶モードクラスターは	
$\mathbf{q}_{\text{even /even}} = \mathbf{q}_1 - \mathbf{q}_2 + \mathbf{q}_3 - \mathbf{q}_4$	(38)
として抽出できる。	

(3). スマートクラスターセンサーの特性

単純支持平板(60 cm x 120 cm x 4 mm)を対象として、2章で導出したスマート・クラスターセンサーの出力特性を考察する。なおその際に、PVDFフィルムの諸元($e_{31} = 75 \text{ mC}/\text{m}^2$ 、 $e_{32} = 6 \text{ mC}/\text{m}^2$)を使用し、モード係数 w_k は、全モードが均等に励起されているものと仮定し、 $w_k = 1$ ($k = 1, 2, 3 \cdots$)とする。

まず形状関数の貼付方向とセンサー感度の関係から吟味しよう。図3は、式(15)に示す形状関数 ($x_0 = 5 \text{ cm}, y_0 = 10 \text{ cm}$) でシェーピングされた Sensor 1 のセンサー出力比を、振動モード(1, 1)~(1, 20)に対して示している。ここでセンサー出力比とは、Type 1 (e_{31} をy軸方向に貼付した場合) における(1,1)モードに対するセンサー出力値で、全てのセンサー出力値を正規化したものである。

圧電応力定数 e_{31} と e_{32} はこの場合 12.5 培の差があるため、その貼付方向によってセンサー出力が大 きく影響される。図3に示すように、Type 1 と Type 2 (e_{31} をx軸方向に貼付した場合)の相違は明ら かで、高次モードになるほど Type 1 のセンサー出力が高まる。これは、y 軸方向のモード指数 n_k が増 大することにより、y 軸方向の歪量が増大し、それをセンサーがセンシングするからである。この傾向 は、式(14)により説明することができる。すなわち、k 番目のモードに対して、Type 1 は $(e_{31}\beta_k^2 + e_{32}\alpha_k^2)$ 、Type 2 では $(e_{31}\alpha_k^2 + e_{32}\beta_k^2)$ の係数がセンサー出力に反映される。いま、モード指数 m_k 、 n_k のうち m_k は 1 として固定し、 n_k のみを増加させると、 α_k^2 は変化せず β_k^2 のみが増加する。Type

1 ではこの β_k^2 に高感度の e_{31} が乗ぜられるため、相乗的に高出力となる。 また、y 方向のセンサーサイズが $y_0 = 10$ cm であるので、(1,1)モードから(1,12)モードにおいては x 軸 方向に走るノーダルラインが当該センサー内を通ることはないが、それ以上の高次モードではセン



図3 スマートクラスターセンサーの設定方向と感度



(1,2)

(I.)

5 S

cm) マキ は等しくなっている。 量も同一となり、Type 1 およびType 2 のセンサー出力 Η 出力の方が Type 1より大きい。 量が y 軸方向の場合より大きいからである。また(1,2) ドに着目すると、 nx のアスペクト比が同一となるため、 らに図3には、(1,1)モードから(1,3)モードまでのセ ドにおいては2つのノーダルエリア ー出力比を拡大表示した図を載せている。(1,1)モ この場合に限ってはType 2のセンサー その理由は、x方向の歪 x,y 双方向の歪 (60 cm x 60

(c)偶/奇モー

ス

ライアンス (p)奇/奇モ (d)奇/偶モード (c)偶

(c)偶/偶

7,

(a)駆動点コンプライアンス

図(2)

スマートクラスターセンサ

一出力

Frequency

Ηz

20

10

100

500

(2,2)

Η 1

7,

の 図 ダル y₀ =1 cm におけるセンサー出力で全デー 増大させた場合のセンサ (1,1)モー 5 9 \rightarrow ンは存在 ズ ドに対して 2 トセンサーの形状が大きいほどセンサー出力は高まり、 しないので、 \mathbf{x}_{0} 1 出力比を表示する を 5cm に固定し、 ノーダルエリア隣接間で発生する信号相殺を考慮する必要はない。こ タを正規化している。(1,1)モードにおいては、 と図4になる。作図に当り、Type 2におけるX₀ =5cm, y₀を1 cmから対象平板の y 方向における長さ 120cm ま また歪量の大きい x 方向に 平板内でのノ 4

PVDF フィルムを貼付した方が、出力感度の面で有利となることが分かる。

つぎに、Type 1 について、4 種類のクラスターに対する各センサー出力比(Sensor 1 の出力で正規 化)を描画すると図 5 となる。ここでは、各クラスターにおける最低次モードを1 つだけ代表させて 示しており、図から明らかなように、これらの出力を加減算することでクラスターフィルタリングで きることが理解されよう。

(4). 実験

周辺単純支持鋼板(61.2 cm x 121.2 cm x 4.2 mm)を対象としてスマート・クラスターセンサーの機能を実験により検証する。形状関数の諸元としては $x_0 = 5$ cm、 $y_0 = 10$ cm を使用し、貼付方向は Type 2 とすることで対象モード・センシングの均等化を指向した。

スマート・クラスターセンサーによる4種類のクラスターフィルタリング結果を図6に示している。 図6(a)は駆動点イナータンスを示しており、対象とする500Hzまでの周波数領域において(1,1)から (1,8)モードまで、都合22個の振動モードが現れている。これらのモードを4種類のクラスター(奇 /奇モード、奇/偶モード、偶/奇モード、偶/偶モード)に弁別した結果が図6(b)~(e)に示されて いる。なお、各センサー出力の加減算はDSPを用いて処理した。

図より明らかなように、対象周波数領域において 22個存在するモードが、4種類のクラスター 群に弁別されており、本論文で提案したスマート・クラスターセンサーの有意性がここに実証されて いる。また、22個のモードの内、縮退に近いケースが数組存在しており、例えば(1,4)モード (139Hz) および(2,2)モード(138Hz) はその状態にあるが、スマート・クラスターセンサーを適用す ることにより、これらのモードが奇/偶モードクラスターおよび偶/偶モードクラスターに整然と弁 別されている。

(5). 結言

PVDFフィルムを基調とするスマート・クラスターセンサーを提案し、その有意性を立証した。本論 文で得られた成果を要約すると次の通り。

1. 分布定数系平板構造物に発現する全ての振動モードを、瑕疵なくクラスタリングできるスマー

ト・クラスターセンサーを提案し、その設計法を明らかにした。

2. センサーをシェーピングする上で必要な形状関数は、ユニークに決定することはできないが、その中で最も簡素な関数が2次関数である。

3. 周辺単純支持平板を対象としてセンサー出力の展開を図ったところ、センサー出力が、既存関数 であるフレネル積分により記述できることが判明した。

4. モード指数の変動が大きい方向にセンサーを貼付することにより、高感度のセンサー出力を得る ことができる。また、ここで提案されたスマート・クラスターセンサーの表面面積を増加するに伴い、 センサー出力も増大する。

5. 周辺単純支持鋼板を対象としてスマート・クラスターセンサーの正当性を実証した。

参考文献

1. Balas, M.J., J. Optimization Theory and Applications, 25-3, (1978), 415-436

2. Meirovitch, L. and Baruh, H., J. Optimization Theory and Applications, 39-2, (1983), 269-291

3. Meirovitch, L., and Baruh, H., J. Guidance, 8-6, (1985), 707-716

- 4. Gustafson, D., and Speyer, J., IEEE Trans. Auto. Contr., Ac-21, (1976), 65-73
- 5. Balas, M.J., J. Guidance, 2-3, 252-253 (1979)
- 6. Aubrun J. N., J. Guidance and Control, Vol. 3, 444-451 (1980)

7.田中信雄·菊島義弘、機論、64-619, C(1998), 780-787
8.田中信雄·菊島義弘、機論、64-619, C(1998), 788-796
9.田中信雄·菊島義弘、機論、64-622, C(1998), 1940-1948
10.田中信雄·菊島義弘、機論、64-627, C(1998), 4231-4239
11.田中信雄·菊島義弘、機論、65-639, C(1999), 4312-4319
12.田中信雄·菊島義弘、機論、59-567, C(1993), 3444-3451
13. Spiegel, M.R., Mathematical Handbook, McGraw-Hill, 1992

(8). 研究発表

(誌上発表および国際会議)

- 1 分布定数系平板構造物を対象とするスマートセンサー・クラスターフィードバック制御系の安定性に ついて
 - 日本機械学会論文集 66 巻 646 号 pp.1793-1799 平成 12 年 6 月 田中・菊島
- 2 柔軟はりの音響パワーマトリクスとパワーモードについて 日本機械学会論文集 66 巻 648 号 pp.2576-2582 平成 12 年 8 月 田中・内野
- 3 スマートクラスターセンサーに関する研究 日本機械学会論文集 67巻 653 号 pp.2576-2582 平成 13年1月 田中・福田
- 4 平板振動放射音のアクティブ・ノイズ・コントロール(ゼロ制御パワーについて) 日本機械学会論文集投稿中(掲載決定) 田中・小林
- 5 平矩形平板を対象とする音響クラスターフィルタリングについて(音響フィールド関数とクラスタリ ングメカニズム)
 - 日本機械学会論文集投稿中(掲載決定)
 - 田中・福田
- 6 分布定数系構造物の一般化クラスター制御に関する研究 日本機械学会論文集投稿中 田中・福田
- 7 中空円筒構造物の音響パワーモードとその抑制について 日本機械学会論文集投稿中 内野・田中
- 8 単純支持平板における進行波遮断制御に関する研究 日本機械学会論文集投稿中 桜井・田中
- 9 Active Vibration/Power Flow Control of a Distributed Parameter Structure
 7th International Congress on Sound and Vibration in Germany 平成 12 年 7 月
 田中
- 10 Active cluster control of structural acoustic power using smart sensors InterNoise 2000 in France 平成 12 年 8 月 田中
- 11 Active Cluster Control of a Planar Structure Fifth Movic in Sydney 平成 12 年 12 月 田中

- Active Vibration Control of a Truss Structure Using Modal Sensors
 Fifth Movic in Sydney 平成 12 年 12 月
 菊島・田中
- 14 Clustr Filtering of aDistributed Parameter Planar Structure Usind Distributed Parameter Sensors Fifth Movic in Sydney 平成 12 年 12 月 福田 · 田中

(口頭発表)

- 15 An Experimental Evaluation of H infinity Control for Acoustic Power Supression Sivrioglu Selim, 菊島 · 田中 日本機械学会 2000 年度年次大会 平成12年8月3日 16 Cluster Control of a Viaduct Road Yuksek Ismail, 菊島 · 田中 日本機械学会2000年度年次大会 平成12年8月3日 17 高架橋道路のクラスター制御(モデル装置を用いたクラスター化の実験的検証) 菊島 · Yuksek Ismail · 田中 日本機械学会2000年度年次大会 平成12年8月3日 18 柔軟はりにおける PVDF フィルムを基調とする反射波フィルタリングについて 岩本・田中 日本機械学会D&D Conference 平成12年9月6日 19 平板構造物におけるパワーフロー局所封じこめ制御に関する研究 桜井・田中 日本機械学会D&D Conference 平成12年9月6日 20 能動騒音制御による振動放射音響パワーの最小化 小林・田中 日本機械学会D&D Conference 平成12年9月6日 21 分布定数系センサーを用いたクラスターフィルタリング 福田・田中 日本機械学会D&D Conference 平成12年9月6日 22 高架橋道路カーブ部のクラスター制御(理論的検討) IYuksek (機械技研), 菊島, 田中 日本機械学会D&D Conference 平成12年9月6日
- 23 高架橋道路カーブ部のクラスター制御(実験的検討)
 菊島・I Yuksek(機械技研)・田中
 日本機械学会D&D Conference 平成12年9月6日

1.2 達成状況

(i)「知的材料・構造システムの解析モデルの確立と基礎データの収集」(名古屋大学)

形状記憶合金の減衰効果に直接関係する応力-歪-温度関係のヒステリシスループの歪 速度による影響および繰返特性などをダイムラー・クライスラーと協力して調べ、提案し ているモデルがこれらの特性を精度良く表現できることを実証した。また、形状記憶合金 箔を接着した梁を設計、製作し、振動試験により減衰係数が2倍程度以上向上することを 実証した。

名古屋大学が提案している形状記憶合金挙動解析モデルは、熱力学的エネルギに基づく 解析モデルにおいて、実験で確認されているような、エネルギ的に安定なヒステリシスル ープを表すことができる世界唯一のモデルである。今年度は、歪速度による影響および繰 返特性を表すことができることを実証し、モデルをさらに発展させた。

(ii)「機内騒音低減技術の開発」(川崎重工業)

11 年度までに確立した制御技術を 600×600mm²の複合材料板要素に適用し、騒音制御 試験を行い、特定周波数の騒音に対しては 15dB の低減、広帯域騒音に対してはオーバー オールで 1.6dB(30%以上)の低減を実現した。また、この技術をデモンストレータおよび実 構造物に適用する場合の圧電セラミックスに対する要求仕様も示した。

特定周波数の騒音を対象とした研究は盛んに行われているが、本研究のような広帯域の 騒音低減を行った研究は国際的にも少ない。また、特定周波数および広帯域の騒音低減に おいて、国際・国内の最高水準の成果を得ている。

(iii)「梁構造の振動低減」(富士重工業)

電気粘性流体を用いた長さ 800mm の梁構造供試体を設計、製作し、振動試験により振動制御効果を計測し、目標値である振動荷重の 50%低減を達成した。また、得られたデー タに基づいた有限要素解析を行い、実構造に適用した場合にも目標値を越える制御効果が 得られる目処を付けた。

分布形態の電気粘性流体を用いた振動制御の研究は少なく、実構造に近い 長さ 800mm の供試体は世界一の寸法である。また、複数の振動モードを対象にした例もなく、世界的 にも最先端の成果である。

(iv)「分布力学系制御技術の研究開発」(東芝)

11 年度まで別個に行ってきた分布センサ系を用いた計測法と分布アクチュエータ系を用いた制御法を統合し、高精度化した計測・制御技術を確立した。また、直径 1m の柔軟宇宙アンテナ模擬構造物の形状・振動制御に確立した計測・制御技術を適用し、その技術の 有効性を実証した。

知的材料を用いた宇宙アンテナの実機に近い規模での形状・振動制御は、他に例はなく、 国際会議で行ったビデオ上映では多くの参加者の関心を引いた。 (v)「高減衰複合材料システムの開発」(ダイムラー・クライスラー)

形状記憶合金の減衰および疲労特性を名古屋大学と協力して計測し、形状記憶合金の減 衰材料としての可能性を示した。この計測結果および11年度までに得られた成果に基づい て形状記憶合金強化複合材料を設計、製作し、振動試験により、減衰係数を約3倍向上さ せることができた。

予歪を与えたオーステナイト相の形状記憶合金を埋込み、疑似弾性時のヒステリシスル ープを利用して減衰効果を増大した研究は世界的にも例はなく、今後の学会発表で、注目 されるであろう。

(vi)「スマート・ストラクチャの静粛化に関する研究」(東京都立科学技術大学)

クラスター制御に用いる、圧電フィルムを用いた分布定数系センサー(スマート・クラ スターセンサ)を提案し、その設計法を明らかにした。また、周辺単純支持鋼板を対象と した振動試験によりスマート・クラスターセンサの有意性を実証した。

クラスター制御法は分布定数系構造物を制御するために提案された簡素で高効率な制御 法であり、かつ、クラスター制御を行うことにより、振動放射音響パワーを抑制するここ とができ、世界的に高い評価を受けている。これまでは、集中センサーの使用を基礎とし ていたため、周波数の上限を制約していたが、この提案により、分布定数系構造物に無数 に存在するすべての振動モードに対処できるようになった。

1.3 結論

今年度はグループとして、最終年度であった。このため、母構造、センサ、アクチュエ ータ等を一体化した小型構造物、構造要素を製作し、確立したアクティブ/パッシブ制御 システム技術をそれらに適用し、振動、騒音、形状制御試験を行った。その結果、減衰係 数の向上、音響パワーの低減で目標値を超える制御性能が得られ、制御技術の適用効果を 実証した。これらは、国際的にも最高水準の成果である。さらに、得られたデータを基に、 デモンストレータおよび実構造物要素に適用する場合の材料素子対する要求仕様を示した。

今後、確立した振動・騒音制御技術は航空機胴体のデモンストレータに反映される。また、電気粘性流体を用いた梁の振動制御技術はヘリコプタブレードの振動荷重低減に、形状記憶合金による振動制御技術は、ヘリコプタブレード、ロケットなどの振動制御に、分 布制御系技術は宇宙アンテナやコンピュータの付属機器、医療機器などの振動・形状制御 への応用が期待される。 2. 研究発表・講演、文献、特許等の状況

- **2.1**研究発表・講演
- 池田・松崎, "圧電フィルムによる膜状構造物の振動制御,"第42回構造強度に関する 講演会講演集, pp. 173-176 (2000).
- 内藤・松崎, ",R 相変態を含む TiNi 形状記憶合金の構成則"第42回構造強度に関する 講演会講演集, pp. 221-224 (2000).
- 内藤・松崎, "TiNi 形状記憶合金の構成モデル,"日本機械学会 2000 年度年次大会講演 論文集, Vol. I, pp. 45-46 (2000).
- K. Nagayasu, T. Hayashi, N. Uchida, H. Nakamura, and H. Takahashi, "Vibration Mode Reconstruction of a Thin Plate by Using Shaped PVDF Sensors," Proceed. of 11th Int. Conf. Adapt. Struct. Tech., Technomic Pub., Lancaster, pp. 50-57 (2001).
- C. Boller, P. Konstanzer, Y. Matsuzaki, and T. Ikeda, "Damping with Shape Memory Alloys for Structural Systems," Proceed. of 11th Int. Conf. Adapt. Struct. Tech., Technomic Pub., Lancaster, pp. 336-343 (2001).
- 6) H. Naito, K. Funami, J. Sato, Y. Matsuzaki, and T. Ikeda, "Stress-Strain Relationship of Pseudoelastic Trans-formations of SMA during Loading Cycles," Proceed. of 11th Int. Conf. Adapt. Struct. Tech., Technomic Pub., Lancaster, pp. 344-350 (2001).
- V. Baburaj, Y. Matsuzaki, N. F. Andrei, and T. Ikeda, "Specific Damping Capacity of Multiphase Unidirectional Hybrid Fiber Composites," Proceed. of 11th Int. Conf. Adapt. Struct. Tech., Technomic Pub., Lancaster, pp. 417-427 (2001).
- V. Baburaj·松崎·池田, "Material Damping Analysis of Multiphase Composites by Multicel Method," 第 37 回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋期大会講演集, pp. 84-85 (2000).
- 9) 内藤・松崎・池田, "NiTi形状記憶合金の疑似弾性変形挙動時の温度計測,"第37回 日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋期大会講演集, pp. 86-87 (2000).
- 10) 松崎・佐藤・内藤・池田, "トレーニング効果を考慮した TiNi 形状記憶合金の変形 挙動モデル,"第37回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋期大会講演集, pp. 88-89 (2000).
- 11) 高橋・三田, "機内騒音軽減技術の研究," 第2回「知的材料・構造システム」シンポジ ウム講演集, pp. 101-104 (2000).
- 12) 萩・高木・町田, "梁構造のアクティブ・アダプティブ構造技術による振動低減,"第2
 回「知的材料・構造システム」シンポジウム講演集, pp. 105-108 (2000).
- 13) 内田・長安・林・中村・高橋, "柔アンテナ構造物の分布系センサ・アクチュエータに よる振動制御・準静的形状制御," 第2回「知的材料・構造システム」シンポジウム講 演集, pp. 109-112 (2000).
- 14) P. Konstanzer, C. Boller, R. Raveendran, B. Schroeder, "Passive Damping

Structural Systems Using Shape Memory Alloys," 第2回「知的材料・構造システム」 シンポジウム講演集, pp. 113-116 (2000).

- 15) 田中・内野, "1 次元分布定数系構造物の音響パワーマトリクスとパワーモードについて," 第2回「知的材料・構造システム」シンポジウム講演集, pp. 121-128 (2000).
- 16) 松崎・池田, "アクティブ・パッシブスマート構造システムの研究開発," 第2回「知的 材料・構造システム」シンポジウム講演集, pp. 129-134 (2000).
- 17) Y. Matsuzaki and T. Ikeda, "R&D of Active-adaptive Structural System Technology," Abstracts of US-Japan Symposium on Smart Materials, p.14 (2001)
- 18) V. Baburaji, Y. Matsuzaki, and T. Ikeda, "Analytical Modeling for Passive Damping in Smart Composites Using a Multicell Method," to appear in Proceed. of SPIE's Symposium on Smart Struct. and Mater. 2001, [4331-01] (2001).
- 19) C. Boller, P. Konstanzer, Y. Matsuzaki, and T. Ikeda, "Damping in SMA-reinforced Composites Using SMA-intrinsic Properties," to appear in Proceed. of SPIE's Symposium on Smart Struct. and Mater. 2001, [4332-60] (2001).
- 20) S. Machida, Y. Matsuzaki, and T. Hagi, "Vibration Control by Smart Structure with Electrorheological Fluid," to appear in Proceed. of SPIE's Symposium on Smart Struct. and Mater. 2001, [4327-25] (2001).
- T. Hagi, Y. Matsuzaki, and S. Machida, "Experiment Evaluation of Smart Structure with Electrorheological Fluid," to appear in Proceed. of SPIE's Symposium on Smart Struct. and Mater. 2001, [4327-26] (2001).
- 22) Y. Matsuzaki, H. Naito, and T. Ikeda, "Unified Modeling of Thermomechanical Behavior of Shape Memory Alloys," to appear in Proceed. of SPIE's Symposium on Smart Struct. and Mater.2001, [4333-52](2001).
- 23) K. Takahashi, K. Bansaku, T. Sanda, and Y. Matsuzaki, "Sound and Vibration Control Tests of Composite Plate by Using Piezoceramic Sensors and Actuators," to appear in Proceed. of SPIE's Symposium on Smart Struct. and Mater. 2001, [4327-79] (2001).
- 24) 内藤・松崎, "低周波周期荷重を加えた形状記憶合金の疑似弾性挙動時の応力-ひずみ
 温度関係,"第 10 回インテリジェント材料シンポジウム講演要旨集, pp. 28-29 (2001).
- 25) S. Selim·菊島·田中, "An Experimental Evaluation of H Infinity Control for Acoustic Power Suppression," 日本機械学会 2000 年度年次大会, (2000).
- 26) I. Yuksek · 菊島 · 田中, "Cluster Control of a Viaduct Road,"日本機械学会 2000 年 度年次大会, (2000).
- 27) 菊鳥・I. Yuksek・田中, "高架橋道路のクラスター制御(モデル装置を用いたクラスター 化の実験的検証),"日本機械学会 2000 年度年次大会, (2000).
- 28) 岩本・田中, "柔軟はりにおける PVDF フィルムを基調とする反射波フィルタリングに ついて,"日本機械学会 D&D Conference, (2000).

- 29) 桜井・田中, "平板構造物におけるパワーフロー局所封じこめ制御に関する研究,"日本 機械学会 D&D Conference, (2000).
- 30) 小林・田中, "能動騒音制御による振動放射音響パワーの最小化,"日本機械学会 D&D Conference, (2000).
- 31) 福田・田中, "分布定数系センサーを用いたクラスターフィルタリング,"日本機械学会 D&D Conference, (2000).
- I. Yuksek・菊島・田中, "高架橋道路カーブ部のクラスター制御(理論的検討),"日本機 械学会 D&D Conference, (2000).
- 33) 菊島・I. Yuksek・田中, "高架橋道路カーブ部のクラスター制御(実験的検討),"日本機 械学会 D&D Conference, (2000).
- 34) Tanaka, "Active Vibration/Power Flow Control of a Distributed Parameter Structure," 7th International Congress of Sound and Vibration, Germany, (2000).
- 35) Tanaka, "Active Cluster control of Structural Acoustic Power Using Smart Sensors," Inter Noise 2000, France, (2000).
- 36) Tanaka, "Active Cluster Control of a Planar Structure," Fifth Movic, Sydney, (2000).
- 37) Kikushima, Tanaka, "Active Vibration Control of a Truss Structure Using Modal Sensors," Fifth Movic, Sydney, (2000).
- 38) Fukuda, Tanaka, "Cluster Filtering of a Distributed Parameter Planar Structure Using Distributed Parameter Sensors," Fifth Movic, Sydney, (2000).

本年度ロ頭発表した研究成果のいくつかは学会誌に投稿する予定である。

2.2 文献

- 田中・菊島, "分布定数系平板構造物を対象とするスマートセンサー・クラスターフィードバック制御系の安定性について,"日本機械学会論文集, 66 巻 646,号 pp. 1793-1799 (2000).
- 2) 田中・内野, "柔軟はりの音響パワーマトリクスとパワーモードについて,"日本機械学 会論文集, 66 巻 648 号, pp. 2576-2582 (2000).
- 3) 田中・福田, "スマートクラスターセンサーに関する研究,"日本機械学会論文集, 67巻 653 号, pp. 2576-2582 (2000).
- 田中・小林、"平板振動放射音のアクティブ・ノイズ・コントロール(ゼロ制御パワーについて)、"日本機械学会論文集投稿中(掲載決定).
- 5) 田中・福田, "平矩形平板を対象とする音響クラスターフィルタリングについて(音響フィールド関数とクラスタリングメカニズム),"日本機械学会論文集投稿中(掲載決定).
- 6) 田中・福田, "分布定数系構造物の一般化クラスター制御に関する研究,"日本機械学会 論文集投稿中.
- 7) 内野・田中,"中空円筒構造物の音響パワーモードとその抑制について,"日本機械学会 論文集投稿中.

- 8) 桜井・田中, "単純支持平板における進行波遮断制御に関する研究,"日本機械学会論文 集投稿中.
- 2.3 特許等 該当なし
- 2.4 その他の公表 (プレス発表等) 該当なし

第Ⅳ章

アクチュエータ材料・素子の開発

1.	研	F究開	発の成果と達成状況	183
	1.1	研到	2開発の成果	183
		要	約	183
	1.	1.1	アクチュエータ材料・素子グループ全体	184
	1.	1.2	急冷凝固による高性能形状記憶合金の作製に関する研究の収集	187
	1.	1.3	形状記憶合金細線と薄膜の作製と評価に関する研究	191
	1.	1.4	磁性形状記憶合金の作製に関する研究	196
	1.	1.5	新アクチュエータ材料の研究	206
	1.2	達成	戈状況	226
	1.3	結論	<u>ь</u>	227
2.	研	F究発	表・講演、文献、特許等の状況	228
	2.1	研究	2発表・講演	228
	2.2	文南	伏	231
6	2.3	特許	Ϋ	232
-	2.4	その	D他の公表(プレス発表等)	233

1. 研究開発の成果と達成状況

1.1 研究開発の成果

要約

急冷凝固による高性能形状記憶合金の作製に関する研究では、電磁浮遊ノズルレス急冷凝固 法という単一材料加工プロセス法を開発して、感温型形状記憶合金の高性能化を試みた。まず、 Ti50-Ni50-X-Cu(X=0~20at %)合金のアーク溶解素材を作成し、その後、液体急冷凝固法による 微細結晶方位制御した箔、帯板試料作成した。形状記憶特性(熱~回復力~ひずみ関係)評価 のうち、DSCによる変態温度、変態温度幅およびひずみ回復量のCu含有量依存性を調べ、Cu=8 ~15at%に早い応答性のアクチュエータ材料があることを指摘した。また、高温型については、 組成を変化させた等比 Ru-Nb 合金の形状回復温度を確認するとともに、600~1000℃付近にわた る変態温度の組成依存性マップを作成した。形状記憶合金細線と薄膜の作製と評価に関する研 究では、Ti(50at%)-Ni(50%at%)細線素材を繰返し熱間・冷間圧延絞込み加工法により、世界最薄 レベルの 10µm まで薄くする製造技術の目途をつけることができ、知的材料・構造システムへの 適用が期待される。それらの材料の形状記憶特性や強度特性も開発した引張りマイクロ試験機 付きのレーザ顕微鏡等で調べることができた。磁性形状記憶合金の作製に関する研究では、磁 場により作動する強磁性形状記憶合金 Ni₂MnGa アクチュエータの開発を目的として、Ni₂MnGa についてバルク材、スッパタ膜、パルス通電焼結材の材料開発を行った。Fe を含む多結晶バル ク材において熱および磁場による形状記憶効果を出現させた。スッパタ膜において熱による2 方向の形状記憶効果と磁場による形状記憶効果を出現させた。多結晶バルク材において世界で 最大の磁歪量(1.4 テスラで0.23%)を達成した。

-Summary-

Material Characteristics of thermoelastic shape memory alloy(SMA) have to be improved toward two times higher level so that SMAs can be applied to smart material/structure systems in engineering view points. For this purpose, the novel material processing technique, " electro-magnetic nozzleless melt-spinning method" was used to control the crystal microstructures of fine columnar grains with strong texture. We succeeded in producing the rapid-solidified TiNiCu(Cu=0⁻ 20at%) foils with narrow hysteresis and ductility Besides, we developed super high temperature near equiatomic RuNb alloy having about 1000°C of shape memory transformation temperature ranging from 600°C to 1000°C. Moreover, very thin foil of TiNi alloy whose thickness is about 10 μ m can be produced by utilizing multiple, alternative hot and cold working processes. The material properties of the developed SMAs by new material processing methods have been evaluated by using laser-microscope with tensile machines. The aim of this project is the development of the ferromagnetic shape memory alloy Ni₂MnGa actuator,

which operates under magnetic field. The bulk, sputtered film and pulse discharge sintering material of Ni_2MnGa were developed. Thermal and magnetic shape memory effects were observed in Fe addition Ni_2MnGa . In the sputtered film, thermal two-way shape memory effects and magnetic shape memory effect were observed. Polycrystal bulk material showed the large magnetic strain 0.23 by magnetic field of 1.4 T. This is the champion data in the world.

1.1.1 アクチュエータ材料・素子グループ全体

(1) 研究開発の目的

急冷凝固による高性能形状記憶合金の作製に関する研究および形状記憶合金細線と薄膜の作 製と評価に関する研究では、変位型センサ・アクチュエータの一つとしての感温型形状記憶合 金(Thermal SMA,以下、TSMA)の機械的特性を大幅に向上させるとともに、さらなる高温型 SMAの開発も目的にしている。

磁性形状記憶合金材料の作製に関する研究では、形状記憶効果を1 T 以下の磁場で発現させることを目的としている。

(2) 全体計画における 12 年度の位置付け

急冷凝固による高性能形状記憶合金の作製に関する研究および形状記憶合金細線と薄膜の作 製と評価に関する研究では、変位型センサ・アクチュエータの一つとしての感温型形状記憶合 金の機械的特性を大幅に向上させるとともに、さらなる高温型SMAの開発も視野に入れてお り、平成12年度は特に以下の開発目標に重点を置いている。

①形状記憶合金(TSMA)の変態歪み量および耐久性(機械的疲労、冷熱繰り返し疲労)を2 倍以上に向上させる。

②100℃以上の相変態温度を有するTSMAを創製する。

③TSMAの製造コストを1/2以下に低減する細線化・薄膜化技術を確立する。

磁性形状記憶合金材料の作製に関する研究の全体計画、平成 11 年度までの成果、平成 12 年 度の位置付けを以下に記す。

【全体計画】

① 合金組成制御技術開発

「アーク溶解法による材料となる合金の作製では、組成の変化で特性(変態温度・キュリー温度)が大きく変わるため、0.01 程度の組成変化をもつ材料を作製する。また、材料内部では組成が均一である材料を作製する。」

② 薄膜製造技術開発

「マグネトロンスパッタ装置を用いた薄膜作製では、ターゲット材の合金組成、スパッタ時の

投入電力、基板の材質とスパッタ時の基板温度、などの成膜条件を最適化し、合金組成制御された膜を作製する。アクチュエータとして使用可能にするため、容易に膜を剥離できる基板を 選ぶ。」

③合金組成と特性の関係研究(磁場・熱・機械的特性および形状記憶効果の定量化)

「結晶変態温度(マルテンサイト変態開始・終了温度および逆変態開始・終了温度)およびキ ュリー温度の組成依存性の測定。弾性定数および硬さなどの機械的特性の測定。形状記憶効果 の測定。」

④ 磁気特性·材料特性改善技術研究

「各組成における磁化および初透磁率の温度変化の測定。結晶粒のサイズおよび集合組織の制 御による脆性の改善。」

【平成 11 年度までの成果】

- アーク溶解法において最適な鋳型を選択し、急冷法により 0.01 程度の組成変化をもち、組成 が均一である材料を作製した。
- ② マグネトロンスパッタ装置を用いた薄膜作製では、ターゲット材の合金組成、スパッタ時の 投入電力、基板の材質とスパッタ時の基板温度、などの成膜条件を最適化し、合金組成制御 された膜を作製した。ポリビニールアルコール基板を用い、容易に基板からスッパタ膜を剥 離できた。
- ③ 結晶変態温度(マルテンサイト変態開始・終了温度および逆変態開始・終了温度)およびキューリー温度の組成依存性の測定し、Ni_{2+x}Mn_{1-x}Ga において Ni 含有量の増加とともにマルテンサイト変態温度は上昇し、キュリー温度は低下した。*x* = 0.18 以上の組成では両者の温度は一致した。
- ④ スッパタ膜において一方向形状記憶効果が出現することを明らかにした。
- ⑤各組成における磁化および初透磁率の温度変化を測定した。
- ⑥スッパタ膜において柱状組織が観察され、脆性が改善された。

【平成 12 年度の位置付け】

① 遷移金属元素の添加による磁気特性の向上。

「Ni₂MnGa において磁気特性を支配しているのは Mn 原子であり、4µ_B程度の磁気モーメントをもつ。この磁気特性を変えるには Fe、Co などの磁気モーメントをもつ遷移金属元素の添加が最も有効である。」

② 磁場で形状記憶効果を発現させる。

「より低磁場で形状記憶効果を発現させるため、磁場による双晶変態が容易に起こる組成を 選択し、添加元素の影響を調べる。」 ③形状記憶素子を試作し、特性を評価する。

「スッパタ膜により形状記憶素子を試作し、マイクロアクチュエータとしての特性を評価する。」

④ 添加元素による材料特性制御技術の開発

「材料特性特に脆性改善のため、結晶粒径、集合組織を添加元素により制御する。」

⑤ 薄膜による特性制御技術の開発

「スッパタ膜の形状記憶特性を向上させるため、熱処理などの特性制御技術の開発を行う。」

(3) 12年度研究成果のまとめ

先ず、形状記憶合金の変態歪み量および耐久性を2倍以上に向上させるためには、(a)新合金 系の探索と(b)金属微視組織制御が鍵であり、そのために、先ず、われわれは、独自に"電磁浮 遊ノズルレス急冷凝固法"という単一材料加工プロセス法を開発して、感温型形状記憶合金の 高性能化を試みた。まず、Ti50-Ni50-X-Cu(X=0~20at %)合金のアーク溶解素材を作成し、その 後、液体急冷凝固法による微細結晶方位制御した箔、帯板試料作成した。形状記憶特性(熱~ 回復力~ひずみ関係)評価のうち、DSC による変態温度、変態温度幅およびひずみ回復量の Cu 含有量依存性を調べ、Cu=8~15at%に大きな変形と早い応答性のアクチュエータ材料があるこ とを指摘した。Cu≧8at%では、通常の溶解加工材料は、偏析などにより粒界脆化を起こしてア クチュエータ素材としては使えなかったものを、急冷微細・均質化組織制御により克服した。な お、最近になって、急冷後に短時間焼鈍化させ、結晶方位を揃えると、約2倍に目標値に達す る回復変形と疲労ボケが少なくなることを見出して来ている。

次に、1000℃以上の相変態温度を有する高温型SMAの創製については、組成を変化さ せた等比Ru-Nb合金の形状回復温度を確認するとともに、600~1000? 付近にわたる変態温 度の組成依存性マップを作成することができ、等比Ru-Ta系では1000℃を越える温度 での熱弾性型相変態をDSCなどで確認しており、当初の目標は80%以上達成できた。

また、Ti(50at%)-Ni(50%at%)細線素材を繰返し熱間・冷間圧延絞込み加工法により、世界最薄 レベルの 10µm まで薄くする製造技術の目途をつけることができ、知的材料・構造システムへの 適用が期待される。それらの材料の形状記憶特性や強度特性も開発した引張りマイクロ試験機 付きのレーザ顕微鏡等で調べることができた。

なお、高性能SMA作製コストの削減については、急冷凝固法という最終段階までの薄板や 細線化を、数分程度でできる加工技術であるので、今後、装置操作の最適化制御をプログラム 化、自動制御化させることにより、また、急冷SMAの大量消費分野の開拓することで、コス トの半減化も不可能ではないと考える。 磁性形状記憶合金材料の作製に関する研究については以下の成果が得られた。 ①Fe を含む多結晶バルク材において熱および磁場による形状記憶効果を出現させた。 ②多結晶バルク材において世界で最大の磁気ひずみ量(1.4 テスラで 0.23%)を達成した。 ③スッパタ膜において加熱・冷却による2方向の形状記憶効果を出現させた。 ④スッパタ膜において磁場による形状記憶効果を出現させた。 ⑤スッパタ膜を利用した形状記憶素子を作製した。

1.1.2 急冷凝固による高性能形状記憶合金の作製に関する研究

(1) はじめに

本研究では、変位型センサ・アクチュエータの一つとしての感温型形状記憶合金(Thermal SMA,以下、TSMA)¹⁾の機械的特性を大幅に向上させるとともに、さらなる高温型SMAの 開発も視野に入れた、以下の開発目標を置いている。

(a) 温型形状記憶合金(TSMA)の変態歪み量および耐久性(機械的疲労、冷熱繰り返し疲労) を2倍以上に向上させる。

(b) 1000℃以上の相変態温度を有するTSMAを創製する。

(c) TSMAの製造コストを 1/2 以下に低減する細線化・薄膜化技術を確立する。

この目標に向けて、我々が現状から取れるべき対策としては、①材料微視組織制御による高 性能新素材開発、②革新的な材料製造プロセス採用による機能性素材の迅速、省エネ、量産化、 低コスト化実現、さらに、③素材の性能を出来るだけ低下させない合目的な材料複合バルク化 加工技術の考案などが鍵となるであろう。

固体アクチュエータ材料としての TSMA は、熱弾性的マルテンサイト相変態が係っていて、 その機能を向上させるためには、図 1.1.2-1 に模式図で示されるような、双晶(ドメイン)の易 動度(Mobility)を促進するために、(1)相変態進行に非常に敏感である試料全体での特定結 晶方位(異方性)制御や(2)ドメイン移動の際に抵抗となる結晶粒界の構造的不連続性(粒 界エネルギーギャップ)を小さくする SMA 結晶界面設計制御とそのための材料プロセス採用が 不可欠となる²⁾。

本年度(平成12年度、3年日)研究では、上記(a)~(c)の目標実現のために導入した、革 新的な材料製造プロセス技術として、"電磁浮遊溶解ノズルレス急冷凝固法"装置³⁾について改 良を加え、さらに安定的に試料を作成できるように努めた。 この技法により、ミクロ的な金 属組織を、急冷凝固とその後の熱処理効果も取入れて制御して、図 1.1.2-2 に示されるように、 従来よりも高機能・高性能の感熱型SMAアクチュエータ材の開発を目指した. 次に、現状 の室温レベル(TiNi,TiNiPd 系など)から600~1000℃を超える高温型SMA(RuNb、RuTa 系等)の研究開発を試みた。また、従来からの繰り返し材料熱間加工(圧延)プロセスにも工 夫を加えて、線引き後圧延繰り返し絞込み加工によるTiNi系極薄板、細線化への可能性を調べ た。そして、これら開発した各種SMAの材料強度、形状記憶変形特性を幅広い温度範囲で把 握するために、繰り返し引張りマイクロ試験機(ステージ)付きのレーザ顕微鏡などを用いて 評価を試みた。

(2) 新溶解凝固プロセス技術(電磁浮遊溶解ノズルレス急冷凝固法)による材料組織制御

新材料製造プロセス技術となる『電磁浮遊溶解ノズルレス急冷凝固法』(図 1.1.2-3)の装置改 良と試料作成条件(電磁コイル通電量、素材供給量と溶湯滴下量調整、回転急冷双ロール間隔 と回転速度(急冷速度)の相互関係、不活性雰囲気調整等)の検討を行い、活性・高融点型の SMA (TiNiPd, NiAlMn 系など)薄板(幅 10mm、長さ 30cm,板厚 0.03⁻ 0.1mm)の作成のメドが ついた。 溶湯急冷凝固条件(急冷ロール回転速度)を変えながら、非結晶質(アモルファス) 形成条件よりも少し手前の急冷用ロール(200mmφ)の回転速度が遅い冷却条件(3600rpm,冷 却速度=10⁴⁻10⁵℃/秒)で、板厚方向に結晶方位の揃った急冷凝固プロセス特有の数μm以内 の粒径からなる微細柱状結晶組織が形成されることを再確認した。また、熱弾性型相変態時に 双結晶(ドメイン)が拡大・移動する際に障害となる結晶界面の構造は変態特性に大きな影響 を与えるので、走査型電子顕微鏡-電子線後方散乱パターン(SEM-EBSP)による結晶方位および 粒界性格分布⁴⁾を調べた。従来の溶解後加工材料との特性比較を試みた結果、図 1.1.2-4 に示さ れるように、大きな結晶異方性(集合組織)と低エネルギー粒界の存在頻度の高い急冷特有な 金属組織形成が確認された。

前年度までに、急冷凝固 Ti₅₀-Ni₅₀at%合金系で形状記憶効果とともに著しい耐食性向上の可能 性も明らかにしたが⁵⁾、本年度は、引き続き、機械的性質や狭い温度ヒステリシスが得られる 3元系 Ti₅₀-Ni_{50-X}-Cu_X(X=0~20at%)の急冷材料の作製を試みた。従来の溶解加工プロセスでは、 粒界脆化などにより Cu=8at%以の組成では圧延・線引き材料は不可能であったが、ここで用い た "電磁浮遊ノズルレス急冷凝固法"では、Cu=17at%までは、形状記憶効果をはっきり示す 薄板材料が作成できた。

これまでに、平面型回転急冷ロールを用いた電磁浮遊ノズルレス急冷凝固法により、活性で 雰囲気中の酸素、窒素や石英ノズルなどと反応してしまい、従来はうまく製造できなかった TiNi 系、高温型 NiAlMn 系、さらには高融点系超高温型 RuNb,RuTa 系形状記憶合金薄板の作製が可 能になった。 本急冷凝固法でできた Ti₅₀Ni₄₀Cu₁₀at%薄板材料の例を図 1.1.2-5 に示す。

また、円錐型回転急冷ロールにより、30µm 直径に達する極めて細い TiNi 短繊維の作製にも 成功した。これらは、SMA要素材料を母材に複合化させたりしてバルクアクチュエータの開 発にも応用できるであろう。

以上、活性で金属間化合物として硬く脆い性質であった従来のSMAが、本提案の電磁浮遊 ノズルレス急冷凝固法では、単一プロセスで薄板(フォイル)や細線(ファイバ)まで作製可 能となり、生産効率やアクチュエータ素材提供の経費の点からもメリットがある。 また、そ れらの素材は、結晶組織が急冷特有であり、後述するように、大幅な特性向上効果が期待され ることが分かった。これらの結果は、知的材料・構造システムへの形状記憶合金アクチュエータ の高速化、複合化などにとって有益である。



図 1.1.2-3 "電磁浮遊ノズルレス急冷凝固 法"概念図

図 1.1.2-4 SEM/EBSP 解析による急冷凝 国SMA材料の結晶粒界性格分布表示例



(TiNi)薄帯板材料例

- 1.1.3 形状記憶合金細線と薄膜の作製と評価に関する研究
- (1) 早い応答性を有する TiNiCu 系形状記憶合金薄板の特性評価

形状記憶アクチュエータ性能に関係する Ti₅₀-Ni_{50-X}.Cu_x(X=0⁻ 20at%)の急冷材料での温度~同 復ひずみ曲線例を図 1.1.3-1、示差熱分析(DSC)による変態温度幅(Δ T=A_f-M_f)と形 記憶ひずみ範囲($\Delta \epsilon_{sME}$)のCu組成依存性を図 1.1.3-2に示す。Cu含有量の増加に伴いDSC よび変態ひずみヒステリシスから定義された Δ T は漸減しており、Cu=15⁻ 17at%組成で最小値 こしたが、Cu=20at%では、金属光沢の強いアモルファス(非結晶質)に似た弾力の強い薄板(リ ボン)となり、形状記憶効果はなかった。 また、 $\Delta \epsilon_{SME}$ については、Cu=5at%で最大を示し た後減少した。この両者の変化特性から、急冷凝固法による TiNiCu 合金では、Cu=10at%付近 の組成合金で、大きな変形能を有して、かつ、シャープで早い感温型アクチュエータの実現可 能なことがわかり、この付近の組成が、早いアクチュエータ材として最適なことがわかった。 また、従来の溶解加工材の Cu=8at%以上での脆化が防げて薄板材ができた理由として、通常の 多結晶材料に比べ、結晶粒の微細化とともに粒界構造そのものの性質が変わり、急冷効果と非 接触溶解により純度が高く、かつ、原料素材内での不純物元素の偏析が大幅に抑制されて破壊・ 腐食に対する強い抵抗を示す原因になっていることが考察される。

(2) 温型形状記憶合金の開発

高温(400℃以上)域で大きな変形と延性(靭性)を有する変位型アクチュエータ・センサ は、高効率タービンエンジン部品や燃焼系機械部品に適用できる魅力有る素材である。固体ア クチュエータの中で代表的な圧電および磁歪材料は、キューリー温度の物性論的制約から現在 でも200~400℃がせいぜいである。この点、TSMAでは、NiAlMn系で600~700℃、 最近発見されたRuNb, RuTaでは、1000℃に達する可能性が指摘されているが、そ の変態温度の組成依存性や形状回復ひずみ、回復力などはまだほとんど分かってはいない。 そ こで、本年度は等比Ru-Nb系合金での超高温SMAの可能性を主に検証した。RuにNb (Nb=46~54at%)粉末を添加してアーク溶解した素材を1400℃で均質化焼鈍させた後に、 DSC、X線結晶回折および熱膨張計による形状回復量の測定を行った。

各相変態温度(Mf, Ms, As, Af)のNb組成依存性(図 1.1.3-3)および1000℃ 付近での3点曲げ形状回復現象(図 1.1.3-4)が、DSCの熱弾性型相変態温度近傍で実際に起 こっていることを内外ではじめて明らかにできた。さらに、等比Ru-Ta系合金でも100 0℃以上での熱弾性型相変態が起こることを確認した。 (3) 返し絞り込み圧延法によるTiNi合金系極薄帯板試料作成と特性評価

従来からの繰り返し材料熱間加工(圧延)プロセスにも工夫を加えて、線引き後繰り返し絞 込み加工による TiNi 系極薄板、細線化への可能性を調べた。

関東特殊製鋼(株)製Ti(49at%)-Ni(51at%)細線素材を繰り返し熱間~冷間圧延法により非常に長く、かつ極薄帯板材料の開発に取り組んだ。冷間圧延では割れやすいTiNiに繰り返し適切な熱温度管理下(徐冷状態)で熱~冷圧延を施し、世界最小レベルの10 μ m以下まで薄い加工技術を達成できた。その引張り応力(σ)~ひずみ(ϵ)特性は、図1.1.3-5に示されるように通常のTiNi材料とほぼ同じでとなり、 $\epsilon = 7 \sim 8$ %の繰り返し歪量と破断伸びは15%以上とれて実用上問題がないことがわかった。

(4) 形状記憶合金の力学的特性評価・耐久性試験の検討

デモンストレータなど実機にTSMAを適用する場合に重要なファクターとなる、形状記憶 効果の耐久性やその際の力学的特性変化を評価するために、新たに、室温~1000℃以上で のTSMA(変態温度マップ:図1.1.3-6 参照)の特性評価を目標とした、繰り返しマイクロ引張り 試験機(ステージ)付きのレーザ顕微鏡システム(図1.1.2-7)での操作を改善し、特に、チャック 間の熱膨張の影響などを軽減・削除化することを、計測系ソフトも含めて取り組んだ。⁶⁾ 図 1.1.3-8 には、熱膨張などを削除した TiNiPd 系合金で200℃までの確認中の形状回復ひずみ 温度ヒステリシス曲線例を示す。これらの計測系の精度改善により、本レーザ顕微鏡システム で各種の TSMA の高性能化原因や高温下での形状記憶メカニズムが直接観察下で実時間データ で議論できることが予想される。また、従来の100℃以下でのTiNi 系合金ワイヤーへの繰り 返し通電加熱疲労試験機による急冷材と従来の溶解加工材との特性・劣化進展度合いの比較し、 少なくとも、加熱~冷却に伴う繰り返しクリープ伸び因子は、急冷による母相基地の微細化強 化などの作用で大幅に抑制できることを確認中である。

(5) まとめ

電磁浮遊ノズルレス急冷凝固法という単一材料加工プロセス法を開発して、感温型形状記憶 合金の高性能化を試みた。まず、Ti50-Ni50-X-Cu(X=0~20at %)合金のアーク溶解素材を作成し、 その後、液体急冷凝固法による微細結晶方位制御した箔、帯板試料作成した。形状記憶特性(熱 ~回復力~ひずみ関係)評価のうち、DSC による変態温度、変態温度幅およびひずみ回復量の Cu 含有量依存性を調べ、Cu=8~15at%に早い応答性のアクチュエータ材料があることを指摘し た。また、高温型については、組成を変化させた等比 Ru-Nb 合金の形状回復温度を確認すると ともに、600~1000℃付近にわたる変態温度の組成依存性マップを作成した。また、 Ti(50at%)-Ni(50%at%)細線素材を繰返し熱問・冷問圧延絞込み加工法により、世界最薄レベルの 10μm まで薄くする製造技術の目途をつけることができ、知的材料・構造システムへの適用が期 待される。それらの材料の形状記憶特性や強度特性も開発した引張りマイクロ試験機付きのレ ーザ顕微鏡等で調べることができた。

謝辞:本研究遂行に当たりましては、渡邊忠雄教授(東北大·工)、山浦真一博士(東北大·流体研)、岡村寛博士(東北大·流体研)のご協力をいただきましたことを感謝致します。 参考文献:

- 1. 特集"形状記憶合金とその応用",日本金属学会会報,24,1(1985)
- Y. Furuya, N. W. Hagood, H. M. Kimura, T. Watanabe and J. Tani: Proc. 9th Inter. Conf. Adaptive Structure and Technology, (edited by N. Hagood and M. Allata (Oct.14-16,Boston,Masachusetts (1998) ,pp.271-280.
- 3. Y.Furuya:1st Japan-France Seminar of Intelligent Materials and Structures, (1998, Sendai, Japan) pp.113-122.
- 4. T. Watanabe: Res Mechanica, 11,47-53(1984)
- 5. 平成11年度RIMCOFレポート
- 6. 古屋泰文、山浦真一、谷順二: 日本金属学会2000年春期大会講演概要集・講演番号 #716(横浜)pp.167



図 1.1.3-1 急冷凝固 Ti(50at%)-Ni(50-X) -CuX(X=0~20at%)合金薄板材での変態温度 (DSC、ひずみヒステリシス温度幅) と形状 記慮相変態歪

図 1.1.3-2 急冷凝固 TiNi(20at%), Ti(20at%)-Ni(20-X)-CuX(X=0~20at%)合金 薄板材の変態ひずみ〜温度ヒステリシス曲 線例



図 1.1.3-3 高温型Ru-Nb(Nb= 46~54at%)での相変態温度(Ms,As) のNb組成依存性

合金の高温形状回復効果の確認



- 194 --



図 1.1.3-5 繰返し絞込み熱間圧延加工法作製した極薄板T i (49at%)-N i (51at%) 引張り特性(室濃測定、板厚10μm、Kantoc研究開発部、内外初の 工業材料化成果)





図 1.1.3-6 各種感熱型形状記憶合金 (TSMA) での逆変態(形状回復)温度マップ

図 1.1.3·7 開発した高温引張りステージ付 きレーザ顕微鏡システム



図 1.1.3-8 レーザ顕微鏡から得られた感温型形状記憶 TiNiPd 系合金の相変態に伴う温度~ひずみヒステリシス曲線例
1.1.4 磁性形状記憶合金の作製に関する研究

(1) はじめに

形状記憶合金(Shape memory alloys: SMA)は、センサーとアクチュエータの両方の機能を 持つことから知的材料の一種として考えられている。形状記憶合金は温度や応力の変化を検知 して、その形状を変えたり、発生する応力を変化させることが知られており、生活・工業関連 分野や医療分野などに幅広く応用されている。

温度や応力のみでなく、電磁場により機能性が発揮できれば多機能化が期待される。このような材料として磁性形状記憶合金Ni₂MnGaがある。この材料は、強磁性の温度領域でマルテンサイト変態を起こすホイスラー型結晶構造の規則格子合金で、高温相で立方晶、低温相で正方晶と構造相変態を起こす [1-3]。Ni₂MnGa合金は強磁性と形状記憶効果を併せ持ち、磁場を駆動力とすることにより従来のSMA(TiNi)での作動応答性を向上させる新たなSMAとして期待される。

本研究では、アクチュエータへの応用を目指し、脆性の改善と生活環境温度で作動する磁性 形状記憶合金の開発を目的として、アーク溶解法によるNi_{2.20},Fe_yMn_{0.80}Ga(y=0⁻0.16)合金の 作製、パルス通電焼結 (Pulse Discharge Sintering : PDS) 法によるNi_{2.1}Mn_{0.9}GaおよびNi_{2.18}Mn_{0.82}Ga 合金の作製、Ni-Mn-Ga合金スパッタ膜の作製を行い、それらの特性を評価した。PDS材では、 超音波速度の温度依存性の測定を行い、動弾性パラメータの温度依存性を求めた。また、スパ ッタ法により成膜条件(ターゲットの化学組成、スパッタ電力)を変化させてNi-Mn-Ga合金膜 を作製し、種々の熱処理を施して、組成、組織、結晶構造に及ぼす熱処理の影響について調査 し、機械的特性や形状記憶効果についても評価した。また、磁場による形状変化についても調 査した。さらに、合金膜を利用したアクチュエータの作製を行った。

(2) 試料の作製方法

(2-1) アーク溶解材およびパルス通電焼結材

非化学量論組成を有するNi_{2.20-y}Fe_yMn_{0.80}Ga ($y = 0^{-0.16}$)、Ni_{2.10}Mn_{0.90}Ga、Ni_{2.18}Mn_{0.82}Ga合金を アーク溶解炉にて作製した。Ni_{2.10}Mn_{0.90}GaおよびNi_{2.18}Mn_{0.82}Ga合金については、得られたボタン インゴットを石英管に真空封入した後、熱処理を施し規則格子合金を作製した。その後、試料 を粉末化し、PDS法により焼結試料を作製した。

(2-2) スパッタ膜

高周波マグネトロンスパッタ装置を用い、水冷されたポリビニルアルコール(PVA) 基板あるいはAl₂O₃基板上に、スパッタ電力を変化させて、Ni-Mn-Ga合金膜を作製した。合金ターゲットには、Ni₅₀Mn₂₅Ga₂₅およびNi₅₂Mn₂₄Ga₂₄の組成を持つ2種類のものを用いた。得られた合金膜に

対して種々の条件下において真空中で均質化熱処理を施し、室温まで炉冷した。

(3) パルス通電焼結材

(3-1) マルテンサイト変態温度

Ni_{2.18}Mn_{0.82}Ga合金について、アーク溶解後に熱処理を加えた試料(a)およびPDS法によって焼結 した試料(b)のそれぞれの変態温度を、示差走査熱量計(Differential Scanning Calorimeter:DSC) を用いて測定した。加熱・冷却速度は0.167 K/s(10 K/min)で行った。これより得られた吸熱・ 発熱ピークからマルテンサイト変態および逆変態開始および終了温度(*M_s、M_f、A_s、A_f*)を求 め、その結果を表 1.1.4 - 1に示す。PDS材の変態温度はアーク溶解材のものと比べて大きな相違 は見られなかった。

(3-2) 圧縮試験

PDS 材を用いて室温で圧縮試験を行った。変位はひずみゲージを用いて測定した。得られた 応カーひずみ線図を図 1.1.4 - 1 に示す。これより PDS 材の弾性定数は約 40 GPa を示している。 PDS 材はアーク溶解材と比べて機械強度が向上し、脆性の改善に有益であることがわかった[4]。 (3-3) 超音波測定

一辺10 mmの立方体に切り出したPDS材に、縦波・横波の超音波発生用振動子(縦波用:5×5 mm、横波用:7×7 mm、周波数:2 MHz)をそれぞれ直接貼り付け、弾性率内摩耗測定装置を用いて超音波測定を行った。本装置では材料内を伝わる縦波、横波の伝播速度(V₁、V₈)および対数減衰率を測定することで超音波速度の温度依存性と弾性定数(ヤング率)などの動弾性パラメータを求めた。得られた音速からを導出した弾性定数の温度依存性を図1.1.4-2に示す。これより、弾性定数はマルテンサイト変態温度付近で大きく変化することがわかり、同時にこの温度領域で温度変化に伴うヒステリシスを確認した。

(3-4) 磁気ひずみ特性

アーク溶解法により作製したNi_{2.20}Mn_{0.80}Ga合金にマルテンサイト逆変態温度直下において1.4 Tの磁場を印加したところ0.23 %の圧縮ひずみが生じた(図1.1.4 - 3)。この値は多結晶Ni₂MnGa 合金おける磁気ひずみの値としては最も大きい値である。

(3-5) 形状記憶特性

PDS材のマルテンサイト変態によるひずみの変化を加熱・冷却速度を1.67×10⁻² K/s (1 K/min) 一定として室温から390 Kまで測定した。ひずみはひずみゲージを用いて測定した。また、5 T の磁場下でも同様の測定を行い、外部磁場の及ぼす影響を調査した。その結果を図1.1.4 - 4に示 す。無磁場下(0 T)ではマルテンサイト変態に伴う約0.2 %のひずみ変化が現れた。一方、5 T の磁場を印加した場合、ひずみ量はほとんど変化しなかったが、マルテンサイト変態温度は全 体的に上昇することがわかった。

アーク溶解法により作製したFeを第4元素として含むNi_{2.20},Fe,Mn_{0.89}Ga(y = 0 ~ 0.16) 合金で は脆性が改善され、曲げによる形状記憶効果の発現が確認された。その一例を図1.1.4 - 5に示す。 この図は、曲げ変形を加えた後、トレーニング処理を施されたNi_{2.16}Fe_{0.04}Mn_{0.80}Ga合金において、 徐荷後、加熱・冷却に伴う形状変化を調査した結果を示す。これより、2方向の形状記憶効果を 発現することが確認された。また、14 Tの磁場を印加することにより磁場誘起形状記憶効果が 発現した。ヒステリシスを小さくすることで必要とされる磁場を低下させることができる。

(4) スパッタ膜

(4-1) 組織

成膜したままのスパッタ膜の組織は、スパッタ電力にはほとんど影響されず、結晶粒が上下 方向に伸びた柱状組織を示した。熱処理を施すことによりその間隔は広くなり、1073 K では柱 状組織が不明瞭になり、脆性が改善された。

(4-2) 結晶構造

成膜したままのスパッタ膜の結晶構造は、スパッタ電力には影響されず、結晶質構造を示した。Ni₅₀Mn₂₅Ga₂₅ターゲットを用いて成膜した場合、均質化熱処理を施すことにより X 線回折 図形に現れる回折ピークは明瞭となり、1073 K 以上で立方晶構造(高温相)からの回折ピーク は非常に強くなり、結晶性が向上した(図 1.1.4 - 6)。Ni₅₂Mn₂₄Ga₂₄ターゲットから得られた熱 処理膜では、正方晶構造(低温相)からの回折ピークが見られた。また、MnO が熱処理膜にお いて確認された。

(4-3) 変態温度および磁気特性

スパッタ膜のマルテンサイト変態温度はスパッタ電力の増加に伴い低下する傾向が見られた。 これは、スパッタ膜の組成がスパッタ電力によって変化し、スパッタ膜中のニッケル含有量が スパッタ電力の増加に伴い単調に減少したためと考えられる。また、ターゲット中のニッケル 含有量が増大した場合、スパッタ膜中のニッケル含有量も増大し、変態温度は高くなった。ス パッタ膜のマルテンサイト変態開始温度は、スパッタ膜中のニッケル含有量の増大に伴い上昇 し、キュリー温度はわずかに低下した。この傾向はバルク材のものと類似した挙動を示した[3]。 そこで、成膜条件を変化させることにより、スパッタ膜の変態温度を制御できることがわかっ た。

(4-4) 機械的特性

スパッタ膜をセンサー・アクチュエータ用形状記憶素子として利用する際に必要となる応力 -ひずみ曲線、弾性定数などの機械的特性を測定した。また、ナノインデンテーション法によ る押込み試験により硬さおよび弾性定数を評価した。成膜したままのスパッタ膜はアーク溶解 材(バルク材)よりも大きな硬さおよび弾性定数を有した。スパッタ膜の硬さ(HUT [68])は、成 膜条件ならびに熱処理条件により変化する組成、組織、結晶構造、析出物の有無などの影響を 強く受け、熱処理温度、時間の増加とともに低下し、600~300の値をとった(図 1.1.4-7)。弾 性定数も同様に熱処理の影響を受け、140~80GPaの間で変化した。

(4-5) 形状記憶効果

Ni₅₀Mn₂₅Ga₂₅ターゲットを用いてスパッタ電力 50 W で作製されたスパッタ膜を PVA 基板から 剥離した後、1073 K で均質化熱処理を施し、平板状の試料を得た。これを短冊状に切断した後、 室温で曲げて不均質ひずみを導入した。このスパッタ膜に対して、加熱・冷却に伴う形状変化 を観察した。その結果を図 1.1.4 - 8 に示す。これより、室温で曲げられたスパッタ膜は、加熱・ 冷却を繰り返した場合、2 方向の形状記憶効果を発現することが確認された。さらに、スパッタ 膜の形状同復ひずみおよび形状回復力などの機械的特性を評価し、作製条件の最適化を試みた。 また、加熱・冷却により 2 方向形状記憶効果を示したスパッタ膜に対して、一定温度で 0~5 T の磁場を印加することにより、自発形状変化を確認した。5 T の磁場から消磁する場合には、1 T 程度の磁場下で形状変化が見られた。

(4-6) アクチュエータの作製

Ni₅₂Mn₂₄Ga₂₄ターゲットを用いてスパッタ電力400 Wで作製されたスパッタ膜をPVA基板から 剥離した後、1073 Kで均質化熱処理を施した。これに微細加工を施し、光学スキャナを試作し た。その構造を図1.1.4 - 9に示す。これは、先端に微小な鏡を取付けた磁性形状記憶合金膜(素 子)、永久磁石および電極からなる。通電しない状態では、磁場によりスパッタ膜が曲げられて いる(図1.1.4 - 10 (a))。スパッタ膜に取付けた電極に通電し加熱すると、スパッタ膜は平板状に 形状変化し、これに伴いに先端に取付けた微小な鏡が移動した(図1.1.4 - 10 (b))。また、矩形 波で通電することにより、先端に取付けた鏡を周期的に移動させることができ、良好に動作し た。

(5) まとめ

本研究では、アーク溶解法を用いてNi_{2.20-y}Fe_yMn_{0.80}Ga (y = 0⁻ 0.16) 合金を、また、PDS法を 用いてNi_{2.1}Mn_{0.9}Ga、Ni_{2.18}Mn_{0.82}Ga合金を作製し、アーク溶解材をPDS材としたことによる変態点 の変化を調べ、動弾性パラメータ(弾性定数)の温度依存性を測定した。また、スパッタ法に よりNi-Mn-Ga合金スパッタ膜を作製し、種々の熱処理を施したものについて、組成、結晶構造、 組織に及ぼす熱処理の影響について調査し、機械的特性や形状記憶効果についても評価した。 また、磁場による形状変化についても調査した。さらに、スパッタ膜を利用したアクチュエー タの作製を試みた。これにより、以下のことがわかった。

- i) PDS材の変態温度はアーク溶解材のものとほとんど変化しなかった。
- ii) PDS材はアーク溶解材と比べて機械強度が向上し、脆性が改善された。
- ii) PDS材の弾性定数はマルテンサイト変態温度付近で大きく変化した。
- iv) アーク溶解法によるNi_{2.20}Mn_{0.80}Ga合金は、1.4 Tの磁場で0.23 %の磁気ひずみを示した。
- v) PDS材では外部磁場を印加することにより、マルテンサイト変態温度の上昇が見られた。
- vi) アーク溶解法によるNi_{2.20-y}Fe_yMn_{0.80}Ga ($y = 0^{-0.16}$) 合金では、脆性が改善され、曲げによる形状記憶効果を示した。また、磁場による形状記憶効果も確認することができた。
- vii) スパッタ膜は、1073 K以上の均質化熱処理により結晶性が向上し、脆性が改善された。

viii) スパッタ膜の硬さ(HUT [68])は、成膜条件ならびに熱処理条件により変化する組成、組織、 結晶構造、析出物の有無などの影響を強く受け、熱処理温度、時間の増加とともに低下した。 弾性定数も熱処理の影響を受け変化した。

ix) 均質化熱処理を施したスパッタ膜は、加熱・冷却により2方向の形状記憶効果を発現した。 また、磁場による形状記憶効果も確認することができた。

x) 均質化熱処理を施したスパッタ膜を用い光学スキャナを作製した。磁場と加熱・冷却により 良好に動作した。

参考文献

- A. N. Vasil'ev, A. R. Keiper, V. V. Kokorin, V. A. Chernenko, T. Takagi and J. Tani: "Structural Phase Transitions in Ni₂MnGa Induced by Low-temperature Uniaxial Stress", Sov. JETP Lett., 58 (1993), 297 - 300.
- 2) A. N. Vasil'ev, A. D. Bozhko, V. V. Khovailo, I. E. Dikshtein, V. G. Shavrov, V. D. Buchelnikov, M. Matsumoto, S. Suzuki, T. Takagi, J. Tani, "Structural and Magnetic Phase Transitions in Shape-Memory Alloys Ni_{2+x}Mn_{1-x}Ga", Phys. Rev. B, **59** (1999), 1113 1120.
- 3) M. Matsumoto, T. Takagi, J. Tani, T. Kanomata, N. Muramatsu and A. N. Vasil'ev, "Phase Transformation of Heusler Type Ni_{2+x}Mn_{1-x}Ga (x = 0 ~ 0.19)", Mater. Sci. Eng., A 273 275 (1999), 326 328.
- 4) 三木寛之,長友武士,羅 雲,佐藤武志,高木敏行,谷 順二,松本 實,阿部利彦,山内 清: 「強磁性形状記憶合金(Ni-Mn-Ga合金系)の機械特性の評価」,第9回電磁現象及び電磁力に 関するコンファレンス講演論文集,(2000), p. 40.



表 1.1.4 - 1 Ni_{2.18}Mn_{0.82}Ga合金のマルテンサイト変態温度(アーク溶解材とバルス通電焼結材)









おける弾性定数の温度依存性 図 1.1.4 - 2 Ni_{2.1}Mn_{0.9}GaおよびNi_{2.18}Mn_{0.82}Ga合金(PDS材)に



図 1.1.4 - 3 Ni_{2.20}Mn_{0.80}Ga合金(アーク溶解材)において1.4 Tの磁場 を印加した時のひずみ変化



図 1.1.4-4 Ni_{2.18}Mn_{0.82}Ga合金(アーク溶解材)における温度に
 伴うひずみ変化に及ぼす外部磁場の影響



図 1.1.4-5 曲げ変形を加えたNi^{2.16}Fe^{0.04}Mn^{0.80}Ca合金(ア ーク溶解材)における加熱・冷却似伴う形状変化



線強度を拡大したもの) 図 1.1.4 - 6 スパッタ膜のX線回折図形に及ぼす熱処理温度の影響(右図はX Ni₅₀Mn₂₅Ga₂₅ターゲットを用い200 Wで作製された



図 1.1.4-7 200 Wで作製されたスパッタ膜の硬さ(*HUT* [68]) に及ぼす熱処理温度の影響



図 1.1.4-8 1073 Kで3.6 ksの熱処理を施されたスパッタ膜における加熱・冷却に伴う形状変形 (Ni₅₀Mn₂₅Ga₂₅ターゲット, 50 W)



図 1.1.4-9 Ni-Mn-Ga合金スパッタ膜を利用した光学スキャナの構造



図 1.1.4 - 10 Ni-Mn-Ga合金スパッタ膜を利用した光学スキャナに おける素子の形状変化

(a) 通電なし(冷却) (b) 通電あり(加熱)

アクチュエータ材料は大別すればセラミックス系、金属系、そしてポリマー系の3 つに分けられる。セラミックス系ではPZT 圧電セラミックスが、金属系では記憶合金 (SMA) そしてポリマー系では電界感応ポリマー(electro-active polymers; 略し て EAP)が集中的に研究されているものである。これらの中では技術の発達度合いに より、圧電セラミックス→SMA→EAP の順に発達→未発達と言える。しかし SMA の中で 磁気感応型 SMA(ferromagnetic SMA; 略して FSMA)は EAP と同じく未だそのアクチ ュエータ材料としての研究が始まったばかりである。



図1. 主要アクチュエータ材料の今後の研究開発方向

図1に上記3種類のアクチュエータ材料の将来の発達すべき研究方向を矢印で示してある。これによれば圧電セラミックスはいかに大きなひずみを出せるかが課題であり、ワシントン大学は傾斜機能(FGM)化によりこれを達成しつつある。

反応スピードのやや遅い熱感応性の SMA は新しい磁気感応性 SMA (FSMA)の採用に

よりそのスピードを ms から 0.1s 程度にまで向上できる見通しが得られた。FSMA の 中で最もよく研究されている NiMnGa はそのもろさ(brittleness)のため、わずかな 応力にしか絶えられないことから、圧縮応力下のみでしか使用できないという大きな ハンディキャップがある。ワシントン大学では引張、せん断応力しかも大きな応力下 でも使用可能なじん性の高い Fe-Pd 系の FSMA を主に研究してきた。この材料は加工 も困難ではなく、3次元形状の作成が可能である。

アクチュエータ材料の中では最大のひずみ/変形が得られ、またその印加電界も圧 電セラミックスに比較してずっと小さい、従って infrastructure がコンパクトにで きる EAP の研究をワシントン大学はここ3年間続け、2,3の EAP アクチュエータを 試設計して、将来使用でき得る方向を見いだした。以下に3つのアクチュエータ材料 について過去3年間の成果と今後の研究課題について述べる。

1.1.5.1 FGM-bimorph 圧電アクチュエータ

理論モデルの開発を第1・第2年度に行い、この理論モデルを使用して最適な FGM-bimorph のミクロ構造を決定した。第3年度には実際にアクチュエータを作成し、 印加電圧と曲げ変位の関係を求め理論値と比較し、良好な一致を得た。図2に3つの 圧電アクチュエータの設計を示す。図2(a)が bimorph, (b) one-sided FGM (別に rainbow type とも呼ばれる)そして (c) FGM bimorph である。



NEDO 研究では(c)の FGM bimorph に焦点を絞り、参考のために bimorph と rainbow の両タイプも検討した。まず、理論モデルを概説して実験データについて述べる。

<u>理論モデル</u>

2つの理論モデルを構築した。すなわちクラシカル積層板モデル (classical lamination model; CLT) と弾性論に基づく2次元板モデル (2D elasticity model) である。

<u>クラシカル積層板モデル(CLT)</u>

図3に FGM 板のモデル図と座標系を示す。板の面内方向に x,y 軸をとり、板厚方向 を z 軸とする。パラメトリック計算では FGM の i 層の物性値(弾性率 C_iと圧電弾性係 数 e_i)は図3に示すように線形に変化するものと仮定して計算した。



図3. FGM ラミネート板で想定した電気的弾性的特性の分布

i番目の層の圧電/弾性方程式は

$$\tilde{\sigma} = \tilde{c} \bullet \tilde{S} - \tilde{e} \bullet \tilde{E} \tag{1}$$

ここでは $\tilde{\sigma}, \tilde{S}, \tilde{E}$ はそれぞれ応力、ひずみ、電界であり、次式で表される。

$$\tilde{\sigma} = \begin{cases} \sigma_{x} \\ \sigma_{y} \\ \sigma_{z} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{cases}, \tilde{S} = \begin{cases} S_{x} \\ S_{y} \\ S_{z} \\ S_{yz} \\ S_{xz} \\ S_{xz} \\ S_{xy} \end{cases}, \tilde{E} = \begin{cases} E_{x} \\ E_{y} \\ E_{z} \end{cases}$$
(2)

一方、čは弾性コンプライアンスであり、次式で表される。

$$\tilde{c} = [c] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & & \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & & \\ & & C_{44} & \\ & 0 & & C_{44} \\ & & & & C_{66} \end{bmatrix}$$
(3)

ここで $C_{66} = \frac{1}{2} (C_{11} - C_{12})$ である。また、圧電弾性係数 \tilde{e} は次式である。

$$\{k\} = \left[\left[A \right]^{-1} \left[B \right]^{-1} \left[D \right] \right]^{-1} \cdot \left[\left[A \right]^{-1} \left[N \right]^{E} - \left[B \right]^{-1} \left\{ M \right\}^{E} \right] \cdot \{E\}$$
(11)

$$\{S^{o}\} = \left[\!\left[B\right]^{-1}\!\left[A\right] - \left[D\right]^{-1}\!\left[B\right]\!\right]^{-1} \cdot \left[\!\left[B\right]^{-1}\!\left[N\right]^{E} - \left[D\right]^{-1}\!\left\{M\right\}^{E}\right] \cdot \{E\}$$
(10)

従って、(9)式をいた中央のひずみ {S° }と極率 {k} で求めると、

$$\{M\} = [B]\{S^{o}\} + [D]\{k\} - [M]^{T} \theta - [M]^{E}\{E\}$$
(9a)

$$\{N\} = [A]\{S^{o}\} + [B]\{k\} - [N]^{T}\theta - [N]^{E}\{E\}$$
(9a)

ここでhiはi番目の層の板厚である。 (1)式、(2)式を(8)式に代入すると、板としての構成式が次式のように得られる。

$$\{M\} = \begin{cases} M_{xy} \\ M_{y} \\ M_{y} \\ M_{xy} \end{cases} = \sum_{i=1}^{n} \int_{h_{i-1}}^{h_{i}} \begin{cases} \sigma_{x} \\ \sigma_{y} \\ \sigma_{xy} \end{cases} z dz$$
(8b)

面内力
$$(N_x, N_y, N_{xy})$$
と面内曲げモーメント (M_x, M_y, M_{xy}) は次式で定義される。

$$\{N\} = \begin{cases} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{cases} = \sum_{i=1}^n \int_{h_i-1}^{h_i} \begin{cases} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{cases} dz$$
(8a)

$$\begin{cases} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{11} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{cases} S_x - \alpha_{11} \Delta T \\ S_z - \alpha_{11} \Delta T \\ 2S_{xy} \end{cases} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix}$$
(7)

ここで"o"は板中央部での値であることを示す。以上より面内構成方程式は次式で与 えられる。

$$S_{x} = S_{x}^{o} + z k_{x}$$

$$S_{y} = S_{y}^{o} + z k_{y}$$

$$2S_{xy} = 2S_{xy}^{o} + z 2k_{xy}$$
(6)

(5)

変位場を
$$x$$
方向 y 方向 z 方向にそれぞれ u, v, w として次式で与えられるとする。
 $u(x, y) = u_o(x, y) + z_G(x, y)$
 $v(x, y) = v_o(x, y) + z_H(x, y)$

 $w(x,y) = w_o(x,y)$

これにより極率 $\bar{k}(k_x,k_y,k_w)$ は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} e_{13} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

方向にそれぞれ u, v, w として次式で与えられるとする。

$$\tilde{e} = [e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{13} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(4)

となる。

<u>2次元板モデル(2D elasticity model)</u>

N 層の PZT 多層ラミネート板が電界により曲がる場合を想定している。弾性板モデ ルでは、板巾方向に平面ひずみを想定しており、*ε_y=ε_{xy}=ε_{yz}=0* と仮定しいる。ラミネー ト板の両端は単純支持である。PZT の構成式は次式で与える。

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl}\sigma_{kl} + d_{mij}E_m$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{ij} - e_{mij}E_m$$
(12)

ここで、*σ_{ij}*, *ε_{ij}*は応力、ひずみテンソル、*E_m*は電場ベクトル、*S_{ijkl}*および *C_{ijkl}*は弾性 コンプライアンスと剛性のテンソル、*e_{mij}*および *d_{mij}*は圧電弾性係数である。平面ひず みにおける構成式を解くと次式のようになる。

$$\begin{cases} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{z} \\ 2\varepsilon_{xz} \end{cases} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{13} & 0 \\ R_{13} & R_{33} & 0 \\ 0 & 0 & R_{55} \end{bmatrix} \begin{cases} \sigma_{x} \\ \sigma_{z} \\ \sigma_{xz} \end{cases} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & \overline{d}_{31} \\ 0 & 0 & \overline{d}_{33} \\ d_{15} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{x} \\ E_{y} \\ E_{z} \end{bmatrix}$$
(13)

 R_{ij} および \overline{d}_{ij} はコンプライアンスおよび圧電弾性係数の解で次式で与えられる。

$$R_{ij} = S_{ij} - \frac{S_{i3}}{S_{33}} S_{j3}$$

$$\overline{d}_{ij} = d_{ij} - \frac{S_{i3}}{S_{33}} d_{3j}$$
(14)

(14)式中の S_{il} , d_{ij} は S_{ijkl} , d_{mij} の圧縮形式表示である。ラミネート板両端における単純 支持の境界条件は次式で与えられる。

$$\sigma_{x}(x=0,z) = \sigma_{x}(x=l,z) = 0$$

$$w(x=0,z) = w(x=l,z) = 0$$
(15)

関数 w は z 軸に沿った面外変形変位である。ラミネート板の上下表面の表面力はゼロ であるので、

$$\sigma_{z}\left(x,-\frac{h}{2}\right) = \sigma_{z}\left(x,\frac{h}{2}\right) = 0$$

$$\sigma_{xz}\left(x,-\frac{h}{2}\right) = \sigma_{xz}\left(x,\frac{h}{2}\right) = 0$$
(16)

また、各層の界面連続性の条件から、

$$\sigma_{z}^{i}\left(x,\frac{h_{i}}{2}\right) = \sigma_{z}^{i+1}\left(x,\frac{h_{i}}{2}\right)$$

$$\sigma_{xz}^{i}\left(x,\frac{h_{i}}{2}\right) = \sigma_{xz}^{i+1}\left(x,\frac{h_{i}}{2}\right)$$

$$u_{i}\left(x,\frac{h_{i}}{2}\right) = u_{i+1}\left(x,\frac{h_{i}}{2}\right)$$

$$w_{i}\left(x,\frac{h_{i}}{2}\right) = w_{i+1}\left(x,\frac{h_{i}}{2}\right)$$

$$(17)$$

が得られる。上式は i 番日の層と(i+1) 番目の層の界面における応力と変位の連続性 を示したものである。すなわち、i = 1 $^{-}$ N-1 の値を取る。 u_i , h_i はそれぞれ i 番日の層 の x 方向の変位関数と層厚を表している。

ラミネート板の板厚方向に次式で表される電場を作用させた。

$$E_{z} = E_{o} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4}{n\pi} \sin(\lambda x)$$

$$E_{x} = E_{y} = 0$$
(18)

上式に基づく電界による i 番目の層に作用する応力は次式となる。

$$\sigma_{x}^{i} = f_{i}^{*}(z) \sum_{n}^{\infty} \frac{4}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{l}x\right)$$

$$\sigma_{z}^{i} = -f_{i}(z) \sum_{n}^{\infty} \left(\frac{n\pi}{l}\right)^{2} \frac{4}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{l}x\right)$$

$$\sigma_{xz}^{i} = -f_{i}^{*}(z) \sum_{n}^{\infty} \left(\frac{n\pi}{l}\right) \frac{4}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{l}x\right)$$
(19)

fi(z) は未知関数であるが釣り合い方程式から

$$f_i(z) = \sum_{j=1}^4 A_{ji} \exp(m_{ji} z_i) + \frac{(\overline{d}_{33})^i E_o}{\lambda^2 R_{33}^i}$$
(20)

のように求めることができる。(20)式中のA_{ji}は定数であり、m_{ji}は次式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} m_{1i} \\ m_{2i} \end{pmatrix} = \pm \lambda \left(\frac{a_i + b_i}{c_i} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\begin{pmatrix} m_{3i} \\ m_{4i} \end{pmatrix} = \pm \lambda \left(\frac{a_i - b_i}{c_i} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$(21)$$

ただし、

$$a_{i} = R_{55}^{i} + 2R_{13}^{i}$$

$$b_{i} = \left[a_{i}^{2} - 4R_{11}^{i}R_{33}^{i}\right]^{2}$$

$$c_{i} = 2R_{11}^{i}$$
(22)

である。

(20)式を用いると、i番目の層内の応力場は次式で定式化される。

$$\sigma_x^i = \sum_{n=1,3,\dots,j=1}^{\infty} A_{ji} m_{ji}^2 \exp(m_{ji} z_i) \frac{4}{\pi} \sin(\lambda x)$$

$$\sigma_z^i = \sum_n^{\infty} \left[\sum_{j=1}^4 -A_{ji} \exp(m_{ji} z_i) \lambda^2 \frac{4}{\pi} \sin(\lambda x) - \frac{(\overline{d}_{33})^i E_o}{R_{33}^i} \frac{4}{\pi} \sin(\lambda x) \right]$$
(23)
$$\sigma_{xz}^i = \sum_n^{\infty} \sum_{j=1}^4 -A_{ji} m_{ji} \exp(m_{ji} z_i) \lambda \frac{4}{\pi} \cos(\lambda x)$$

応力・変位関係より変位は次式となる。

$$u_{i} = \sum_{n}^{\infty} \left\{ \sum_{j=1}^{4} A_{ji} \exp\left(m_{ji} z_{i} \right) \left[\lambda R_{13}^{i} - \frac{R_{11}^{i}}{\lambda} m_{ji}^{2} \right] + \left[\frac{R_{13}^{i}}{R_{33}^{i}} (\bar{d}_{33})^{i} - (d_{31})^{i} \right] \frac{E_{o}}{\lambda} \right\} \frac{4}{\pi} \cos(\lambda x)$$

$$w_{i} = \sum_{n}^{\infty} \sum_{j=1}^{4} A_{ji} \exp\left(m_{ji} z_{i} \right) \left[R_{13}^{i} m_{ji} - \frac{\lambda^{2} R_{33}^{i}}{m_{ji}} \right] \frac{4}{\pi} \sin(\lambda x)$$
(24)

上式から得られる解は、(15)式から(17)式で示される境界条件のすべてを満足する必要がある。

<u>Rainbow 型圧電アクチュエータ</u>

Rainbow 型の FGM ラミネートを模式的に図4に示す。異なる気孔率を有する n 層 からなるラミネート板の気孔率は次式で示される。

$$\left(1 - \frac{P_i}{P_n}\right) = \left(\frac{h_i}{h_n}\right)^m \tag{25}$$

ここで *P_i* および *P_n*はそれぞれ *i* 番目と上端の層の気孔率を示しており、*h_i*はラミネ ート下端面から *i* 番目の層までの厚さを示している。各層の厚さが等しい場合は *m*=1 となる。(25)式で表される FGM の気孔率に関する指数則を既述の CLT に適用すると、 図5に示すような曲率の解析解が得られる。曲率は *m*=1.92 の時に最大となる。*m*=1.92 に対応した実際の材料組織を図6 に示す。

上記 FGM 材料を用いたアクチュエータに 100V の電圧をアクチュエータに印加した場合の曲率をひずみゲージを用い実験的に測定した。図7がその結果を時間に対し

て示したものである。板曲率は時間の経過とともに徐々に増加し、1.5sec 後に最大値 を示す。最大曲率を示す時間はラミネート板全厚に印加電圧が届くまでの時間に対応 している。その後、PZT のパルス特性により曲率は徐々に低下する。図中の破線は(25) 式を CLT に適用して得られた 100V の電圧印加に対する計算値であるが、実験値とよ く一致していることがわかる。曲率の最大値は長さ 12mm のラミネート板自由端にお ける 6.5µm の変位に対応している。



図4. FGM 圧電セラミックス アクチュエータの構成



図 5. FGM アクチュエータ(長さ 12mm, 巾 3mm,厚さ 1mm)のm値に対 する板曲率の変化



図6. m=1.92 における実際の FGM 断面組織



図7.100Vの電界の下でのFGM アクチュエータ(*m*=1.92) の変形曲率

FGM-Bimorph 型圧電アクチュエータ

傾斜機能(FGM)型圧電アクチュエータの理論モデルに基づき、また限られた圧電 材料の範囲の中で、我々は図2に示した (a)標準 Bimorph、(c) ワシントン大学が提 案している FGM-Bimorph 型の圧電アクチュエータを設計した。両材料の構成を図8 (a), (b)にそれぞれ示す。これら2つの材料に対して、電界に対する曲げ変位応答を計 測した。図9に示すような片持ち梁の端部変位をレーザ変位計で測定し、得られた印 加電界と変位の関係を図 10 に示す。図 10 には CLT に基づく理論値を実線で示して いる。実験結果では、変位・印加電界の関係は標準 bimorph 型ではほぼ線形であるが、 FGM-bimorph 型では非線形となっている。また、ワシントン大学の提案している FGM-bimorph 型圧電アクチュエータは標準 bimorph 型に比較して、同じ印加電界の下 で 20%以上大きな曲げ変位を示し、しかも内部応力は理論モデルの 60%以下に抑えら れている。大きな変位応答が低い内部応力で得られたことで、使用寿命の大幅な改善 が期待される。



図8. 供試材の積層材料構成の模式図



図9. PZT アクチェータの実験状況



(b) FGM-bimorph 型アクチュエータ図 10. 電界と変位の関係における実験値と理論値の比較

<u>今後の研究課題</u>

図 10 に示すように CLT 理論モデルで予測した変位が実験値を下回っているので、 ワシントン大学が提案した FGM-bimorph 型アクチュエータの片持ち梁曲げ変位をさ らに精密に予測する理論モデルを構築する。このため、2D-elasticity model の境界条件 (現在は両端単純支持としている)に片持ち梁の境界条件を導入し、より厳密な解析 解を得るモデルを検討する。

1.1.5.2 形状記憶合金 (SMA)

磁気感応型形状記憶合金

我々はここ数年、TiNi ワイヤを用いた新しいスマート複合材料の開発を行ってきた。 それらは主に高温での流動応力や靱性、疲労寿命といった機械的特性向上を狙ったも のである。しかし、熱感応型の SMA を用いたアクチュエータは熱伝導を用いるために 作動速度に限界があり、最速でも 1sec から 10sec といったオーダーの時間が必要で ある。アクチュエータのほとんどにおいて、より高い力と大きな変位といった出力容 量ばかりでなく、速い作動速度が要求される。高応答速度、高出力の両観点から磁気 感応型 SMA (FSMA) が適した材料であると言える。

FSMA の一つである NiMnGa の相変態は Webster により 1984 年に始めて報告された。 その後、NiMnGa において磁場により、かなり大きなひずみが誘起されることが報告さ れてきた。これらはマルテンサイト変態温度以下の温度、すなわち 100%マルテンサイ ト相の状態で磁場を印加したもので、マルテンサイトバリアントが磁場により再配列 した結果として大きなひずみが出現したものである。この機構は「バリアント再配列 機構」と呼ばれている。この機構では、大きなひずみは得られるものの、応力は数 MPa といった低いレベルであり、またその時の温度は一般に室温よりもかなり低いもので ある。また、大きなひずみを得るためには比較的強い磁場の印加が必要であり、巨大 で重量の大きな電磁石を伴うことになる。強力かつコンパクトなアクチュエータを室 温で作動させるためには FMSA の相変態を利用した別の機構が必要となってくる。





最近、我々は FSMA を用いた新たなアクチュエーション機構を提案した。これは連 鎖的に起こる現象を利用した「ハイブリッド機構」と呼ばれているもので、高応答速 度かつ高出力が期待できる。磁場の印加により、アクチュエータ材料内に生じた大き な応力場がオーステナイト相からマルテンサイト相への相変態を誘起するものであ り、変態による剛性低下(図 12 参照)により大きな変位出力が可能となる。「バリア ント再配列機構」と「ハイブリッド機構」の両者を図 11 に応力・温度・磁場の3次 元相図として示す。図 11 (a) が前者、(b).(c) が後者を説明したものである。図 11 (c) は(b)をある温度で切断した場合の拡大図で、図中の2つの曲線の内、内側がマルテ ンサイト変態開始を、外側が変態終了の境界を示している。図11(c)に示したハイブ リッド機構における印加磁場(IL-IL)は図11(a)に示すバリアント再配列機構での印 加磁場 H₀に比較してずっと小さいものである。







 \square

図 14. Fe-30at%Pd 合金の熱膨張/収縮

(a) Fe-Pd 合金系 (b) Fe-Pt 合金系 (

上述した NiMnGa 系 FSMA は非常に脆性であることがわかり、アクチュエータ材料とし

ては不適当な特性であることから、我々はより延性の高い Fe-Pd あるいは Fe-Pt 合金 系に研究対象を移した。Fe-Pd および Fe-Pt 合金系の相変態における結晶形態を図 13(a). (b) にそれぞれ示す。Fe-Pd 系においては、fcc から fct への格子変化であり、 格子定数はオーステナイト c 軸に収縮、a 軸 b 軸は伸張する。一方、Fe-Pt 系では相 変態により fcc 規則相から bct への格子変化を示す。我々は両合金系において、形状 記憶効果、超弾性挙動の両者を既に確認している。図 14 は Fe-Pd 合金系における温 度に対する試料の膨張/収縮の変化を示したもので、図中には変態温度(Ms, Mf, As, Af) も示している。図 15 は Fe-Pd 多結晶体の応力誘起変態を確認した観察写真であ る。一方、磁場のみを印加した場合は図 16 に示すように一部のマルテンサイトプレ ートが消滅する逆変態を確認した。



(a) 磁場中での曲げ試験の装置模式図

図 17. Fe-Pd 合金, NiMnGa 合金片持ち梁の磁場中での曲げ変形比較実験 Fe-Pd 系 FSMA が NiMnGa 合金よりも磁気誘起アクチュエータ材料として優れているこ とを実証するために、高磁場勾配の下に Fe-Pd 合金と NiMnGa 合金の両試験片を置き、 その挙動を比較した。図17(a)に試験装置の模式図を示す。両試料を片持ち梁として 磁極の間に配置し、磁場印加時の試料曲率を CCD カメラで観察・比較した。その結果 が図 17 (b), (c)で、Fe-Pd 合金の方が NiMnGa 合金に比較してはるかに大きなひずみ が誘起されていることがわかる。

熱感応型形状記憶合金

形状記憶合金 Ni-Ti は熱感応であり、かつ変態の温度ヒステレシスが大きいため、 反応速度が遅い。しかし、そのアクチュエータとしての荷重・変位出力の大きさは極 めて大きく、最適な使用状況になるように用途を選べば、価値あるアクチュエータ材 料の一つである。実用上、変形と記憶形状回復(応力・ひずみ関係)の安定性は設計 上重要な課題であり、稼働前に最適なトレーニングを施し、アクチュエーションの安 定性を確保する必要がある。ここではNi-Ti 合金のねじり変形に対する形状記憶効果 の繰返し安定性に関して検討を行った。試験片は Af 温度約 110℃の薄肉円筒試験片 (外形 8mm, 内径 6mm) である。室温にて一定トルクでせん断負荷を行った後、赤外 線加熱により160℃まで加熱し、ねじり変形を回復させる負荷/熱サイクルを繰返し 付与し、形状記憶効果の安定性と耐久性に関して評価した。図 18 に試験装置の写真 を示す。図 19 が熱処理ままの材料に対して 100 回までの負荷/熱サイクルを付与し た場合の応力・ひずみ関係の変化を示したものである。熱処理ままの試験片は特に繰 返しサイクル初期に著しい硬化を示し、最大ひずみが減少するとともに、回復ひずみ が減少し残留ひずみが増大する。その後も徐々に回復ひずみは小さくなり、応力・ひ ずみ関係は安定しない。こうした応力・ひずみ関係を安定させるためにトレーニング が必要であるが、本来材料の持つ形状記憶特性を損なわない効果的な手法を模索する 必要がある。ここでは以前から検討を進めてきた一定荷重下での熱サイクル繰返し変 態によるトレーニング(以下、定トルクトレーニングと呼ぶ)の効果を検討した。こ こで行った定トルクトレーニングとは、トレーニング後に行う形状記憶性耐久試験で の最大負荷応力より 20%高い一定応力を付与し、Af 温度以上までの加熱/Ms 温度以下 までの冷却を 10 回繰返し、その後、無負荷の状態でさらに 90 回の熱サイクルを付与 するものである。図 20 に定トルクトレーニング中のせん断ひずみの変化を熱サイク ル回数に対して示す。過大応力の下での繰返し変態により大きなせん断ひずみを生じ るが、10 回の繰返し変態でひずみの増加はほぼ飽和していることがわかる。一方、除 荷後の熱サイクルにおいては、試験片は双方向形状記憶変形を示す。これは定トルク 繰返し変態時に導入された局所ひずみによる残留応力に起因したものと考えられる。 熱サイクルの付与とともに、ひずみ振幅は徐々に小さくなっていくが、100 回の熱サ イクル終了後、約2%のひずみが残留する。図21は定トルクトレーニングを施した試 験片に対して行った形状記憶性耐久試験(負荷/除荷/加熱回復/冷却)で得られた 応力・ひずみ線の変化である。定トルクトレーニングを施した場合の応力・ひずみ関

係は、熱処理ままの場合に比較して、ひずみ振幅の変化が少なく非常に安定的である ことがわかる。しかし、熱処理ままの状態で 3.5%から 4%あったひずみ振幅は定トル クトレーニングにより 2%程度にまで減少しており、アクチュエーションの応答安定化 のために機能が犠牲になった形となっている。定トルクトレーニングを施した場合の ひずみ振幅の減少は、図 20 に示したトレーニング後の残留ひずみとほぼ対応してお り、本トレーニングは全ひずみ振幅の内、不安定な部分をあらかじめ残留ひずみとし て安定化させる効果を与えるようである。



図 18. 形状記憶効果のねじり変形 繰返特性評価試験の概況



図 19. 熱処理ままの試験片より得られた 応力・ひずみ



図 20. 定トルクトレーニングにおける 熱サイクル付与回数に対する せん断ひずみの変化



図 21. 定トルクトレーニングを施した 試験片より得られた応力・ひずみ 関係の繰返し安定性

<u>今後の研究課題</u>

磁気感応型 SMA については、その応力・温度・磁場の3次元変態相図を実験と熱力

学に基づく理論モデルの両方から完成させる。この図は今後、磁気感応型アクチュエ ータ材料を用いて新たなアクチュエータを設計する際には、設計者に対して重要な設 計指針を与えるものである。

一方、熱感応型 SMA に関しては、さらに最適なトレーニング条件をせん断力と軸 力の両者に対して検討を行う。このデータも上記3次元変態相図と並んで、アクチュ エータ設計において重要なデータベースとなるものである。 1.1.5.3 電界感応ポリマー (electroactive polymers, 略して EAP)

EAP ベースのアクチュエータは図1に示したように小さい印加電圧(1・2V 程度) の下で最大のひずみが得られるため、省エネルギー、自然環境・人体に優しい将来の アクチュエータ材料といえる。ワシントン大学では NEDO 新アクチュエータ材料の一 つの重要な材料として、少ない研究時間ではあるが、過去3年間に渡り研究開発を行 ってきた。ここではその成果と近未来の研究方向を述べる。我々の EAP 研究の概要を まとめると以下のようになる。

- (1) EAP の中で Hydrogel アクチュエータに焦点を当て、そのナノレベルでの特徴に 着眼したモデルの構築
- (2) Nafion ベースのマイクロアクチュエータの設計と製造プロセスの検討
- (3) その他の EAP アクチュエータ材料の検討

各々について以下にその内容を簡単に説明する。

EAP アクチュエータのモデル構築

我々は次の2つのhydrogelアクチュエータ材料に関して、モデルの構築を行った。 (I) 両性ゲル (amphoteric gel) のイオン分布モデル, (II) Nafion ゲルアクチュエ ータのイオン分布・運動モデルとその曲げ変位モデル

両性ゲルは自由に動くイオン(mobile ion)と高分子の鎖に保持された動けないイ オン(immobile ion)の両方が全体としてバランスして、マクロ変形は軸対象になる ように設計したものである。図 22 (a)に示すように、電界を印加すると軸方向に伸縮 するゲルである。このゲルに陽・陰極材を取り付けて、わずか 1V 程度の電位でも動 くように設計した。理論モデルに関しては図 22 (b)に示す。ここで図中の¢は電位であ る。Boltzman-Roisson式を近似的に解くことで電位とイオン分布を得たが、実験値の それと傾向的に一致した(Tamagawa and Taya, 2000)。



(a) 電界印加方向と伸縮方向 (b)アクチュエーションの理論モデル 図 22. 両性ゲル

Nafion は固体電界質膜として開発されたものであるが、これに電極を取り付けると わずかな電界印加で曲げ変位を生じるアクチュエータ材料となる。我々はこの曲げ変 形が生じる機構をナノレベルでモデル化した。Nafion は電解質として NaSO₃を使用し ているので Na⁺イオンが陰極へ移動する。しかし、SO₃⁻イオンはテトラフルオロエチレ ンの鎖に付着して動けない。また、Na⁺イオンに水分子がいくつか付着して移動するた め、水分子が場所的に陰極側に偏って、Nafion アクチュエータ板としては陰極側へ凸 の曲げ変形を生じる。これにより水分子の場所偏在により水分子の傾斜が生じ、自由 水分子 (Na⁺イオン付着していない)が傾斜の低い方へ流れ、最終的な平衡状態に到達 する。従って、水分子を伴った Na⁺イオンが陰極側へ動き(これを forward motion と 呼ぶ)、次に自由水分子の陽極側への移動(これを backward motion と呼ぶ)すると いったの2つのメカニズムが短時間に連続して起きる。したのが図 23 (a), (b) に相当する方程式は次式で表される。

forward motion:
$$eE = \eta_1 v_1 + kT \frac{\partial \ln C}{\partial x} + nkT \frac{\partial \ln w}{\partial x}$$
 (26)

backward motion:
$$\eta_2 v_2 = kT \frac{\partial \ln w}{\partial x}$$
 (27)

ここで E は印加電界、e は荷電子エネルギー、 η_1 は速度 v_1 で動く水分子を伴った Na⁺ イオンに対する周囲の水分子の抵抗力、 η_2 は自由水分子が陽極側へ速度 v_2 で動くと きの周囲の抵抗力、k はボルツマン係数、T は絶対温度、C は Na⁺イオン濃度、w は水 分子(クラスターと自由の両者)の濃度、x は Nafion 板の板厚方向の座標軸である。 初期条件と境界条件を考慮し、上式を場所(x) と時間(t)の関数として水分子の濃 度(w)を解く。これを実際に得られている Nafion中の水含有量とマクロひずみの関 係式に代入すると、Nafion板の板厚方向のひずみ分布 $\varepsilon(x)$ が得られ、曲げ変形量を求 めることができる。同様のモデルは既に Nemat-Nasser と Li (2000)により、また Tadokoro ら (2000)により試みられているが、前者のモデルは Nafion 板の曲げ変形の 時間依存性を無視した静的モデルであるため、動的挙動の解析には適当ではない。一 方、Tadokoro らのモデルは我々のモデルに類似しているものの、水分子が自由分子と クラスター(Na⁺イオンに付着した)水分子の2種類あるにもかかわらず、これらを区 別していないため、物理的精密さに欠ける。



(a) forward motion(b) backward motion図 23. Nafion ゲルの変形機構のモデル化

Nafion アクチュエータの設計

従来のNafion ベースアクチュエータはPt を電極材料として曲げ変形モードを利用 してきた。我々はPt の上に Cu をコーティングして、2重電極とした Nafion アクチ ュエータを設計した。図 24 に曲げ変形(曲率)と電圧印加時間との関係、そして曲 げ変形の写真を示す。これによれば我々の設計した Pt-Cu 電極を取り付けた Nafion 板の方が大きな変形を示していることがわかる。この Pt-Cu 電極を取り付けた Nafion 板をベースに、我々はした。図 25 (a) にその写真を示す。上下方向の大きな変位(図 25 (a))のみならず、ある程度の力(F)も負担でき得ることが図 25 (b) よりわかる。 この loop 型 Nafion アクチュエータはマイクロアクチュエータの素子として期待され ている。



図 24. Nafion アクチュエータの曲げ変形量と電圧印加時間との関係



(a) 電界の on/off でのアクチュエーション

(b) 荷重·変位出力

図 25. Nafion ゲルを用いた loop 型アクチュエータ

<u>今後の研究課題</u>

上記の Nafion ベースのアクチュエータは小印加電圧で大変形を生じるが、その寿 命は Nafion 中の水分子が蒸発することで決まり、アクチュエータとしての機能が停 止する。従って、今後の研究は Nafion アクチュエータの上に特別なコーティングを 施し、水や酸素などの移動を阻止する必要がある。また、Nafion 板の表面は曲げ変形 により 1^{-2%}の軸ひずみを受けるが、この曲げひずみの下で割れなどを生じないような コーティング材を選ぶ必要がある。こういった条件を満足するコーティング材は現在 存在しないため、この NEDO 研究では今後2年間にこの大変形を許容し、かつ水や酸 素の移動を阻止できるような特別なコーティング膜の開発に専念する。 1.2 達成状況

急冷凝固による高性能形状記憶合金の作製に関する研究および形状記憶合金細線と薄膜の作 製と評価に関する研究では、形状記憶合金の変態歪み量および耐久性を2倍以上に向上させる ために、独自に"電磁浮遊ノズルレス急冷凝固法"という単一材料加工プロセス法を開発して、 感温型形状記憶合金の高性能化を試みた。まず、Ti50-Ni50-X-Cu(X=0~20at %)合金のアーク溶 解素材を作成し、その後、液体急冷凝固法による微細結晶方位制御した箔、帯板試料作成した。 形状記憶特性(熱~回復力~ひずみ関係)評価のうち、DSCによる変態温度、変態温度幅およ びひずみ回復量のCu含有量依存性を調べ、Cu=8~15at%に大きな変形と早い応答性のアクチュ エータ材料があることを指摘した。Cu≧8at%では、通常の溶解加工材料は、偏析などにより粒 昇脆化を起こしてアクチュエータ素材としては使えなかったものを、急冷微細・均質化組織制御 により克服した。なお、最近になって、急冷後に短時間焼鈍化させ、結晶方位を揃えると、約 2倍に目標値に達する回復変形と疲労ボケが少なくなることを見出して来ている。組成を変化 させた等比Ru-Nb合金の形状回復温度を確認するとともに、600~1000℃付近にわたる変態 温度の組成依存性マップを作成することができ、等比Ru-Ta系では1000℃を越える温 度での熱弾性型相変態をDSCなどで確認しており、当初の目標は80%以上達成できた。

また、Ti(50at%)-Ni(50%at%)細線素材を繰返し熱間・冷間圧延絞込み加工法により、世界最薄 レベルの 10µm まで薄くする製造技術の目途をつけることができ、知的材料・構造システムへの 適用が期待される。それらの材料の形状記憶特性や強度特性も開発した引張りマイクロ試験機 付きのレーザ顕微鏡等で調べることができた。

磁性形状記憶合金材料の作製に関する研究に関しては以下のことが達成できた。 (1)結晶粒径制御による材料の特性評価

- · 粉末試料をパルス放電焼結(PDS)法によりバルク材を作製した。
- ・ センサ・アクチュエータ用形状記憶素子として適用する際に必要となる応力-ひずみ曲線、
 弾性定数などの機械的特性を測定した。マルテンサイト変態温度付近で弾性定数に変化が見られた。

· 磁場中でのひずみ測定により可逆的な巨大磁歪が生じることを確認した。

(2)薄膜においての磁気形状記憶効果の発現

- ・ スパッタ膜の加熱・冷却による2方向の形状記憶効果を確認した。
- ・ スパッタ膜の磁場による形状記憶効果を確認した。
- スパッタ膜の形状回復ひずみおよび形状回復力などの機械的特性を評価し、作製条件の最適 化を試みた。

(3)低磁場下での形状記憶効果の発現

- ・熱や磁場などの外場を加えることによる機能特性の変化について評価し、低磁場下における
 形状記憶効果の発現の可能性について検討した。
- (4) センサ・アクチュエータ用形状記憶素子の試作と特性の評価
- ・ 薄膜について、結晶構造およびその温度変化などの基礎物性ならびに組織などの金属材料特
 性を測定した。
- スパッタ膜についてセンサ・アクチュエータ用形状記憶素子として適用する際に必要となる
 応力-ひずみ曲線、弾性定数などの機械的特性を測定した。
- スパッタ膜をアクチュエータとしてのデバイス設計への可能性を検討し、試作した。

1.3 結 論

急冷凝固による高性能形状記憶合金の作製に関する研究および形状記憶合金細線と薄膜の作 製と評価に関する研究では、独自に"電磁浮遊ノズルレス急冷凝固法"という単一材料加工プ ロセス法を開発して、感温型形状記憶合金の高性能化を試みた。DSC による変態温度、変態温 度幅およびひずみ回復量の Cu 含有量依存性を調べ、Ti50-Ni50-(8~15at%)-Cu 合金に大きな変形 と早い応答性のアクチュエータ材料があることを指摘した。Cu≧8at%では、通常の溶解加工材 料は、偏析などにより粒界脆化を起こしてアクチュエータ素材としては使えなかったものを、 急冷微細・均質化組織制御により克服した。なお、最近になって、急冷後に短時間焼鈍化させ、 結晶方位を揃えると、約2倍に目標値に達する回復変形と疲労ボケが少なくなることを見出し て来ている。次に、組成を変化させた等比Ru-Nb合金の形状回復温度を確認するとともに、 600~1000℃付近にわたる変態温度の組成依存性マップを作成することができ、等比Ru-Ta 系では1000℃を越える温度での熱弾性型相変態をDSCなどで確認しており、当初の目標 は80%以上達成できた。また、Ti(50at%)-Ni(50%at%)細線素材を繰返し熱間・冷間圧延絞込み 加工法により、世界最薄レベルの 10µm まで薄くする製造技術の目途をつけることができ、知 的材料・構造システムへの適用が期待される。それらの材料の形状記憶特性や強度特性も開発し た引張りマイクロ試験機付きのレーザ顕微鏡等で調べることができた。なお、高性能SMA作 製コストの削減については、急冷凝固法という最終段階までの薄板や細線化を、数分程度でで きる加工技術であるので、今後、装置操作の最適化制御をプログラム化、自動制御化させるこ とにより、また、急冷SMAの大量消費分野の開拓することで、コストの半減化も不可能では ないと考える。

磁性形状記憶合金材料の作製に関する研究Feを含む多結晶バルク材において熱および磁場に よる形状記憶効果を出現させた。多結晶バルク材において世界で最大の磁気ひずみ量(1.4 テス ラで 0.23%)を達成した。また、スッパタ膜において熱による 2 方向の形状記憶効果と磁場に よる形状記憶効果を出現させた。さらにスパッタ膜を用い光学スキャナを作製した。磁場と熱 により良好に動作した。

- 2. 研究発表・講演、文献、特許等の状況
- 2.1 研究発表·講演
- M. Matsumoto: "Ferromagnetic Shape Memory Alloy Ni₂MnGa", Seminar of Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe, Germany, (12, 1.13, 14).
- 2) 松本 實:「最近の形状記憶合金研究,強磁性形状記憶合金」,日本機械学会東海支部ワークショップ「形状記憶合金の機能特性と応用」,(12.3.9).
- 長友武士,三木寛之,高木敏行,阿部利彦,大塚 誠,羅 雲,松本 實,佐藤武志,山内 清:「強磁性形状記憶合金の機械的特性評価」,日本機械学会東北支部第35期総会,(12.3.11).
- M. Matsumoto: "Development of New Shape Memory Alloys", 9th Magnetodynamics (MAGDA) Conference, Brisbane, Australia, (12.3.20).
- 5) 松本 實, 大塚 誠, 板垣乙未生, 高木敏行, 藤野威男:「強磁性形状記憶合金 Ni₂MnGa 薄 膜の特性」, 第9回 Magnetodynamics (MAGDA)コンファレンス, (12. 3.20).
- 6) 三木寛之,長友武士,羅 雲,佐藤武志,高木敏行,谷 順二,松本 實,阿部利彦,山内 清:「強磁性形状記憶合金 (Ni-Mn-Ga 合金系)の機械特性の評価」,第9回 Magnetodynamics (MAGDA)コンファレンス, (12. 3.20).
- 7) 千葉広樹, 大塚 誠, 松本 實, 板垣乙未生, 藤野威男:「熱処理に伴う Ni-Mn-Ga 3 元系合 金膜の組織変化」, 日本金属学会第 126 回春期大会, (12. 3.31).
- 8) V. Khovailo, H. Miki. T. Takagi, M. Matsumoto, T. Kanomata and T. Harada: "Electrical Resistivity of Ni_{2+x}Mn_{1-x}Ga (x = 0[~] 0.19)", 日本金属学会第 126 回春期大会, (12. 3.31).
- 9) V. Khovailo, H. Miki, T. Takagi, M. Matsumoto and R. Kainuma: "Sequence of Structural Transitions and Magnetism in Ni-Mn-Ga Compound", International Symposium on Relationship Between Magnetic and Structural Properties-Basis and Application, 日本鉄鋼協会フォーラム「磁気特性と材料信頼性」, Hanamaki, Japan, (12. 4.18).
- 10) Y. Yamazaki, Y. Abe and M. Matsumoto: "Critical Behavior of Magnetic Shape-Memory Systems in Magnetic and Structural Phase-Transformation", International Symposium on Relationship Between Magnetic and Structural Properties-Basis and Application, 日本鉄鋼協会フォーラム「磁気特性と 材料信頼性」, Hanamaki, Japan, (12. 4.18).
- 11) 大塚 誠, 千葉広樹, 松本 實, 板垣乙未生, 高木敏行:「Ni₂MnGa スパッタ膜の形状記憶

効果」, 日本機械学会 2000 年度年次大会, (12.8.3).

- M. Matsumoto, M. Ebisuya, T. Kanomata and T. Fujino: "The Change of Specific Heat Accompanied with Phase Transformations of Nonstoichiometric Ni₂MnGa", Third International Symposium on Shape Memory Alloys and Related Technology (SMART-2000), Sendai, Japan, (12. 8.18).
- H. Miki, T. Nagatomo, V. V.Khovailo, T. Takagi, J. Tani, T. Abe, M. Matsumoto, and K. Yamauchi: "Composition Dependence of the Phase Transition on the Ferromagnetic Shape Memory Ni₂MnGa Intermetallics", Third International Symposium on Shape Memory Alloys and Related Technology (SMART-2000), Sendai, Japan, (12, 8,19).
- 14) A. N. Vasil'ev, E. I. Estrin, R. A. Ischuk, V. V. Khovailo, M. Matsumoto, T. Takagi and J. Tani: "Dilatometric Study of Ni_{2.16}Mn_{0.84}Ga and Ni_{2.19}Mn_{0.81}Ga under Magnetic Field", Third International Symposium on Shape Memory Alloys and Related Technology (SMART-2000), Sendai, Japan, (12. 8.19).
- 15) V. V. Khovailo, T. Takagi, A. N. Vasil'ev, A. D. Bozhko, M. Matsumoto and J. Tani: "Premartensitic and Martensitic Phenomenon in Ni-Mn-Ga Alloys", Third International Symposium on Shape Memory Alloys and Related Technology (SMART-2000), Sendai, Japan, (12. 8.19).
- 16) A. Cherechukin, T. Takagi, J. Tani, M. Matsumoto, V. Khovailo and V. Koledov: "Magnetic Field Controlled Martensitic Transition in Co and Fe Containing Ni-Mn-Ga", Third International Symposium on Shape Memory Alloys and Related Technology (SMART-2000), Sendai, Japan, (12. 8.19).
- 17) M. Ohtsuka and K. Itagaki: "Effect of Heat Treatment on Properties of Ni-Mn-Ga Films Prepared by a Sputtering Method", Third International Symposium on Shape Memory Alloys and Related Technology (SMART-2000), Japan, (12. 8.19).
- R. Note and M. Matsumoto: "Control Method of Ni₂MnGa Alloys Composition", Third International Symposium on Shape Memory Alloys and Related Technology (SMART-2000), Sendai, Japan, (12. 8.20).
- 19) M. Matsumoto, M. Ohtsuka, K. Itagaki, T. Takagi and T. Fujino: "Ferromagnetic Shape Memory Alloy Ni₂MnGa Films.", Fifth European Symposium on Martensitic Transformations and Shape Memory Alloys (ESOMAT 2000), Como, Italy, (12. 9. 6).
- 20) 松本 實, 戎谷真樹, 鹿又 武, 野手竜之介, 藤野威男:「ホイスラー型 Ni_{2-x}Mn_{1-x}Ga (x = 0⁻
 0.19) の相変態に伴う帯磁率および比熱変化」, 日本物理学会第 55 回年次大会, (12. 9.22).
- 21) 山崎篤志,今田 真,宇都宮裕,重本昭彦,室 隆桂之,斎藤裕児,関山 明,野手竜之介, 松本 實,鹿又 武,菅 滋正:「強磁性ホイスラー合金 Ni₂MnGa の高分解能光電子分光と 磁気円二色性測定」,日本物理学会第 55 回年次大会,(12.9.25).
- 22) 大井 淳, 大塚 誠, 松本 實, 板垣乙未生:「ナノインデンテーション法による Ni-Mn-Ga

合金膜の機械的特性の評価」,日本金属学会第127回秋期大会,(12.10.2).

- 23) 礒川真治,大塚 誠,松本 實,板垣乙未生,藤野威男:「ニッケル過剰の組成を有する Ni₂MnGa 合金薄膜における形状記憶効果」,日本金属学会第127回秋期大会,(12.10.3).
- 24) 松本 實,高木敏行,山内 清:「磁性形状記憶合金アクチュエータの開発」,第4回知的 流体・材料システムに関するワークショップ(アクチュエータ材料・素子),(12.10.13).
- 25) M. Ohtsuka, K. Chiba, M. Matsumoto and K. Itagaki: "Structure of Ni-Mn-Ga Films Prepared by a Sputtering Method", Second International Conference on Processing Materials for Properties (PMP 2000), USA, (12.11.8).
- 26) M. Matsumoto: "Ferromagnetic Shape Memory Alloy", School of Mathematics and Physics, Department of Physics, Loughborough University, Loughborough, United Kingdom, (12.11.15).
- 27) 松本 實, 大塚 誠, 高木敏行, 板垣乙未生, 藤野威男:「強磁性形状記憶合金 Ni₂MnGa 薄膜の作製と評価」, 日本機械学会第8回機械材料・材料加工技術講演会, (12.11.28).
- 28) 長友武士, 三木寛之, 高木敏行, V. Khovailo, 松本 實, 阿部利彦:「金属間化合物 Ni₂MnGa における相変態の組成依存性」, 日本機械学会第 8 回機械材料・材料加工技術講演会, (12.11.28).
- 29) 山内 清,高木敏行,松本 實,大塚 誠:「磁性形状記憶合金 Ni₂MnGa の機械・磁気特性」, 第2回「知的材料・構造システム」シンポジウム, (12.12.6).
- 30) K. Ohi, S. Isokawa, M. Ohtsuka, M. Matsumoto and K. Itagaki: "Phase Transformation of Sputtered Ni-rich Ni₂MnGa Films", The 12th Symposium of the Materials Research Society of Japan, Kawasaki, Japan, (12.12. 8).
- 31) T. Takagi, V. Khovailo, T. Nagatomo, H. Miki, M. Matsumoto and T. Abe: "Reversible Magnetostrain in SPS (Spark Plasma Sintering) Ni-Mn-Ga Alloy", The 12th Symposium of the Materials Research Society of Japan, Kawasaki, Japan, (12.12.8).
- 32) M. Ohtsuka, M. Matsumoto and K. Itagaki, "Two-Way Shape Memory Effect of Sputtered Ni-rich Ni₂MnGa Films", The 12th Symposium of the Materials Research Society of Japan, Kawasaki, Japan, (12.12. 8).
- 33) 礒川真治,鈴木基彦,大塚 誠,松本 實,板垣乙未生,藤野威男:「拘束時効による Ni 過剰 Ni₂MnGa 合金膜の形状記憶効果」,日本金属学会第 128 回春期大会,(2001.3.29).
- 34) Y. Furuya: "Rapid-Solidified Metallic Actuator Materials Developed by Electromagnetic Nozzleless Melt Spinning Method" Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 604[Materials for Smart Systems III], MRS, pp109-116(2000).
- Y. Furuya and J. Tani: 2Researches of Smart Materials in Japan", Materials Science Forum, 3/27-28, pp91-98(2000).
- 36) Y. Furuya, Z. He, H. Okumura, M. Matsubara, S. Yamaura, J. Tani, S. Kise and M. Aiba:

"Development of High Temperature Shape Memory Alloys as Thermal Sensor/Actuator and Related Technology" Smart-2000, pp36-37, (2000), Tohoku University.

- 37) Y. Furuya and T. Watanabe: "Rapid-Solidification Effect on Microstructure and Properties of Shape Memory Actuator Materials", Proceedings of Fundamental Study and Application of Intelligent Nano and Mesoscopic Structural Materials by Fluid Control, Sendai, pp107-114 (2000).
- 38) 古屋泰文、賀志栄: "1000℃を超える超高温変位型センサ・アクチュエータ特性を有する等比 Ru-Ta 合金"、日本金属学会 2000 年秋期大会(10/1-3、名古屋)講演予稿集、
 p. 413(2000).
- 39) Y. Furuya, Ze Hirong: "Thermoelastic Properties of Super High Temperature Ru-Ta Shape Memory Alloy", Proc. of MRS' 2000 Fall Meeting (Boston, Dec., 2000)
- 40) Y. Furuya: "Development of new shape memory actuator materials and their applications for smart material system", Proc. 3rd Japan-France Seminar on Intelligent Materials and Structures, (Aug. 28-30, 2000, Tokai University) pp134-139(2000).

2.2 文献

- I. E. Dikshtein, D. I. Ermakov, V. V. Koledv, L. V. Koledov, T. Takagi, A. A. Tulaikova, A. A. Chechukin and V. G. Shavrov: "Reversible Structural Phase Transition in Ni-Mn-Ga Alloys in Magnetic Field", JETP Letters, Vol. 72 (No. 7), pp. 373 - 376, (2000).
- Yanwei-Ma, S. Awaji, K. Watanabe, M. Matsumoto and N. Kobayashi: "Effect of High Magnetic Field on the Two-Step Martensitic-Phase Transition in Ni₂MnGa", Applied Physics Letters, Vol. 76 (No. 1), pp. 37 - 39, (2000).
- Yanwei-Ma, S. Awaji, K. Watanabe, M. Matsumoto and N. Kobayashi: "Investigation of Phase Transformations in Ni₂MnGa using High Magnetic Field Low Temperature X-ray Diffraction System", Physica B, Condensed Matter, Vol. 284-288, pp. 1333 - 1334, (2000).
- Yanwei-Ma, S. Awaji, K. Watanabe, M. Matsumoto and N. Kobayashi, "X-ray Diffraction Study of the Structural Phase Transition of Ni₂MnGa Alloys in High Magnetic Fields", Solid State Communications, Vo. 113, pp. 671 - 676, (2000).
- 5) M. Matsumoto, "Development of New Shape Memory Alloys", *Proc. of the 9th MAGDA Conference*, pp. 16 19, (2000).
- 6) 松本 實, 大塚 誠:「強磁性温度領域で効果を発揮する形状記憶合金」,工業材料, Vol. 48 (No. 9), pp. 72 75, (2000).
- 7) M. Ohtsuka, M. Matsumoto and K. Itagaki, "Structure of Ni Mn Ga Films Prepared by Sputtering Method", *Processing Materials for Properties II*, Ed. by B. Mishra and C. Yamauchi, TMS (The
Minerals, Metals and Materials Society), Warrendale, pp. 301 - 306, (2000).

- 8) 松本 實, 大塚 誠, 三木寛之, 高木敏行:「強磁性を有する形状記憶合金の最近の研究の 展開」, 日本 AEM 学会誌, Vol. 8 (No. 4), pp. 445 - 453, (2000).
- 9) V. V. Khovailo, T. Takagi, A. N. Vasi'ev, H. Miki, M. Matsumoto and R. Kainuma, "On Order-Disorder (L₂₁ → B2') Phase Transition in Ni_{2+x}Mn_{1-x}Ga Heusler Alloys", Physica Status Solidi (a), Vol. 183 (No. 2), R1-R3, (2001).
- 10) 松本 實, 吉田 肇, 鹿又 武, 藤野 威男:「非化学量論 Ni₂MnGa の相変態温度に及ぼ す圧力効果」, 東北大学素材工学研究所彙報, Vol. 56 (No. 1, 2), pp. 35 - 38, (2001).
- K. Ohi, S. Isokawa, M. Ohtsuka, M. Matsumoto and K. Itagaki, "Phase Transformation of Sputtered Ni-rich Ni₂MnGa Films", Transaction of the Materials Research Society of Japan, Vol. 26 (No. 1), 2001, pp.291-294.
- Ohtsuka, M. Matsumoto and K. Itagaki, "Two-way Shape Memory Effect of Sputtered Ni-rich Ni₂MnGa Films", Transaction of the Materials Research Society of Japan, Vol. 26 (No. 1), pp.201-204, (2001).
- 13) T. Takagi, V. Khovailo, T. Nagatomo, H. Miki, M. Matsumoto, T. Abe, Z. Wang, E. Erstrin, A. Vasil'ev and A. Bozhko, "Magnetostrain in Ni₂MnGa Compounds Prepared by Arc-melting and SPS Methods", Transaction of the Materials Research Society of Japan, Vol. 26 (No. 1), pp.197-200, (2001).
- 14) M. Ohtsuka and K. Itagaki, "Effect of Heat Treatment on Properties of Ni Mn Ga Films Prepared by a Sputtering Method", International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 12 (No. 1/2), (2001), (in press).
- 15) A. N. Vasil'ev, E. I. Estrin, R. A. Ischuk, V. V. Khovailo, M. Matsumoto, T. Takagi and J. Tani,
 "Dilatometric Study of Ni_{2.16}Mn_{0.84}Ga and Ni_{2.19}Mn_{0.81}Ga under Magnetic Field", International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 12 (No. 1/2), (2001), (in press).
- 16) V. Buchelnikov, A. N. Vasil'ev and T. Takagi, "Phenomenological Theory of Structural and Magnetic Phase Transitions in Shape Memory Ni-Mn-Ga", International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 12 (No. 1/2), (2001), (in press).
- 17) 古屋泰文: "形状記憶合金を用いた知的構造材料"材料科学(日本材料科学会誌)特集号「知 的構造材料の最近の話題」7月号、pp.293-298.

2.3 特許等

 特願 2000 年第 89128 号,「Ni-Mn-Ga 系形状記憶合金とその製造方法」,〈出願人〉株式会社 トーキン,高木敏行,〈発明者〉内山博昭,山内 清,高木敏行,三木寛之,大塚 誠,松本 寛,2000 年 3 月 28 日出願

(等表発スマで)表公の所のろ ₽.4

5年0002, [(皇育ごとな풻心工人) 外銷熟冬い動料材料麵始 金合創活状況], 間液業工匠目(1

日9日

日8年0002, ((SS部位大北東) 健举で防め・焼加 金合創活状況・ 計跡 単一、 間 産業 工 所 日 (2

日 81

第Ⅴ章

デモンストレータ試験

1. 研	所究開発の成果と達成状祝	237
1.1	研究開発の成果	237
	要 約	237
1	.1.1 デモンストレータ試験全般	239
1.1	.1.2 「損傷検知・損傷抑制」デモンストレータ試験	245
1 .]	.1.3 「騒音・振動低減」デモンストレータ試験	265
1.	.1.4 デモンストレータ試験総合技術評価	289
1.2	達成状況	294
1.3	結論	295
2. 研	邪究発表・講演、文献、特許等の状況	295
2.1	研究発表・講演	295
2.2	文献	296
2.3	特許	296
2.4	その他の公表(プレス発表等)	296

· · · ·

.

1. 研究開発の成果と達成状況

1.1 研究開発の成果

要 約

「知的材料構造システムの研究開発」では、ヘルスモニタリング技術、スマートマニュフ アクチャリング技術、アクティブ・アダプティブ構造技術、アクチュエータ材料・素子、 の各要素技術開発が進められている。さらに、これら要素技術の研究開発成果を統合し、 航空機胴体構造に焦点を当てた実構造物要素を試作することにより、それぞれの研究開発 項目の目標達成度を検証するとともに、知的構造システム技術の共通基盤技術を確立する ことを目的して、デモンストレータ試験を進めている。

何をデモンストレーション・テーマとするかについて、本プロジェクトに参画する大 学・企業・国研の研究者による議論の結果、

i)技術的に先進的であるか?

ii) 将来の航空機に対してユーザーのニーズが予想されるか?

iii) 成果を胴体構造モデル試験で確認できるか?

iv)研究開発日程上、妥当か(間に合うか)?

の観点から、最終的には、次の7つのテーマに絞り込んだ。

①複合材料埋め込み光ファイバセンサによる衝撃損傷検知

②統合化 AE センサネットワークによる実用衝撃負荷の同定

③分布型 BOTDR 広領域ひずみ分布測定

④炭素繊維の導電性を利用したセンサ(スマートパッチ)

⑤SMA(形状記憶合金)箔を用いた損傷制御

⑥低コスト RTM 一体成形パネルの知的成形

⑦騒音および振動の低減

将来航空機への実用化を考慮することから、胴体構造は炭素繊維複合材(CFRP)を主体に することにした。開発コスト削減のため、技術実証に影響のない部分は一部金属構造も採 用する。デモンストレータのサイズは、実大にすると、試作期間およびコスト、試験場ス ペース等から開発日程・規模の面から実現が難しい、一方、小さなサイズにすると、現実 に存在する材料・部品をサイズに合わせて小さくすることには限界があり、技術実証に必 要な物理的パラメータ(ひずみ、応力、固有振動数等)が実機とデモンストレータで不一致 になり、実証の意味がなくなる。多数のケース・スタディの結果、直径:1.5m、長さ:3 mの胴体構造モデルに決定した。デモンストレーション・テーマ毎に合致させる物理的パ ラメータを分類・整理するとともに、開発日程上の制約からも、デモンストレータは2体 製作することにした。1体は「損傷検知・損傷抑制」(上記デモンストレーション・テーマ の①~⑥)、他の1体は「騒音・振動の低減」(同⑦)である。

試作開発は次の計画日程に沿って進めている。

i) 平成 11 年度:システム構想

ii) 平成 12 年度:基本設計

iii) 平成13年度:詳細設計および部品製作

iv) 平成14年度:デモンストレータ組立および試験

- Summary -

The "R&D for Smart Materials and Structures System" project has proceeded since late 1998. At first it consisted of four sub-themes, which were 1) Health Monitoring, 2) Active Adaptive Structures, 3) Smart Manufacturing and 4) Actuator Materials and Devices. In early 2000 the Concept Demonstrator Program was added to the project. It is aimed at evaluating what extent each research and development items of sub-themes will attain their targets and establishing common basic technologies for a future "Smart Structures System". The Concept Demonstrator Program is focused on a aircraft fuselage of the composite structure and designed to integrate research and development results into it.

Over 25 research and development items have proceeded in the project since late 1998. It is too many to include these all items in the Concept Demonstrator, and, as such, we decided to select several ones among over 25 themes in accordance with the followings criteria, namely,

i) Is it advanced in technology?

- ii) Do users need it for future fuselage structures?
- iii) Is it possible to show results of the research and development on the demonstrator?

iv) Is it appropriate to the research and development schedule of the project ? Finally we selected the followings seven themes.

- ①Optical Fiber Sensors Embedded into CFRP Laminated Structures
- ②Integrated AE(Acoustic Emission) Sensor Network Systems
- ③Strain Distribution Measurement in Wide Area Using Distributed BOTDR Sensors
- (4) Damage Detection Sensors Using Conductivity of Carbon Fiber(Smart Patch)
- (5)Damage Suppression System Using Embedded SMA(Shape Memory Alloy) Foils
- ©Smart Manufacturing on Low Cost Integrated Panel by RTM(Resin Transfer Molding)

⑦Noise and Vibration Reduction Technology in Internal Cabin

Structures of the demonstrator are mainly composite materials. The diameter of the demonstrator is about 1.5m (approximately 1/3-scaled size of a small class jetliner) and the length about 3m, in order to simulate primary structural parameters and reduce development cost and schedule. Two demonstrators are going to be produced due to limitation of scaled rules and the development schedule. The one is aimed at Damage Detection and Suppression which demonstrate the above items 1) through 6) and the other one Noise and Vibration Control. The former demonstrator will be loaded by the external bending moment and the internal air pressure. The latter will be tested in the anechoic room and/or reverberation room.

We finished preliminary design at the end of March 2001 and the Demonstration Test will start on April 2002, after producing parts of demonstrators and assembling them.

1.1.1 デモンストレータ試験全般

(1)研究開発の目的

「ヘルスモニタリング技術の開発」、「スマートマニュファクチャリング技術の開発」、「ア クティブ・アダプティブ構造技術の開発」および「アクチュエータ材料・素子の開発」の研 究開発成果を統合した実構造物要素を試作し、それぞれの研究開発項目の目標の達成度を 検証するとともに、知的構造システム技術の共通基盤技術を確立する。

(2)全体計画における 12 年度の位置付け

11 年度の基本構想検討で、実構造物要素として、小型旅客機の1/3 程度の直径を有す る航空機胴体構造供試体を製作し、損傷検知・損傷進展制御、騒音・振動レベル低減につい て検証を行うことにした。これに基づき、12 年度は基本設計を実施した。最終年度までの 全体計画を下記に示す。なお、基本設計の詳細は補足説明書"デモンストレータ試験 基 本設計報告書"としてまとめた。



(3)12 年度研究成果のまとめ

i) 全般;

- ①デモンストレータ試験での検証項目(デモンストレーション・テーマ)毎に、達成目標
 に対する達成度の検証方法を明確にした。⇒ 表 1.1.1-1
- ②デモンストレーション・テーマ毎および供試体設計・製作、試験実施に関する平成12年 度以降の研究開発計画を設定した。⇒ 図1.1.1-1
- ii)「損傷検知・損傷抑制」デモンストレータ試験;
- ①試験装置として、架構の構造および諸元、負荷装置および計測装置の仕様、試験場のレイアウトを明らかにした。試験場は幅約12m、奥行約16m、高さ約6mの規模となる。
- ②試験方法として、デモンストレーション・テーマ毎の負荷様式、負荷様式に対する荷重 値、試験シーケンス、計測方法、検査方法を明らかにした。
- ③6つのデモンストレーション·テーマ毎に、試験目的、評価部位、評価項目、試験項目、 取得データ、等を明らかにした。
- ④試験供試体の胴体外径、胴体長、隔壁パネル、等の主要諸元および構造様式、予想発生最 大歪、重量、等を明らかにした。構造様式は、他様式との比較検討結果から、スキン~ ストリンガ方式を選定した。
- ⑤試験供試体の部品構成、分割方法、各部品間のインターフェース、上面・下面・側面・隔壁の各パネルへの設計要求、等を明らかにした。さらに、各パネルの構造様式、相互の結合方式、スキン板厚、センサ・アクチュエータの配置および取り付け方法を明らかにした。
- ⑥所要負荷に対する強度および剛性を定量的に評価し、試験に耐え得ることを確認した。
 ⑦上面、側面、下面の各パネルに相当する平面パネルについて、部分構造試験供試体を製作・試験し、センサおよびアクチュエータの埋め込みおよび取出し法、等の技術を取得した。
- iii)「騒音·振動低減」デモンストレータ試験;
- ①制御対象周波数領域、達成目標の検証方法、所要試験(振動特性データ取得試験、振動制御試験、騒音制御試験ⅠおよびⅡ)の仕様および試験実施場所、等を明らかにした。
- ②試験装置として、供試体の支持方法、振動·音響の励起方法、計測装置の仕様、所要試験 冶具、等を明らかにした。
- ③試験方法として、励起周波数領域、所要計測データおよび計測方法、データ処理手順、 等を明らかにした。
- ④試験供試体の構造様式、部品構成および適用材料、NASTRAN による構造-音響連成 運動解析に基づくフレームおよびストリンガ等主要部品の配置および形状・諸元、隔壁 部の形状・諸元、等を明らかにした。
- ⑤使用を想定するセンサおよびアクチュエータの諸元および使用数量、配置等に関する第 1次見積りを実施した。30mm×30mm、厚さの0.5mmのセンサおよびアクチュエ ータが各々180個、合計360個が必要になる、見積りである。

	デモンストレーション・ テーマ	達 成目標および検証方法			
1	複合材料埋め込み光フ ァイバセンサによる 衝撃損傷検知	達成目標	複合材構造に埋め込んだ光ファイバセンサシ ステムにより、衝撃損傷の発生位置を特定でき ることを実証する。		
T		検証方法	光ファイバセンサによる衝撃損傷検知結果を 実測による衝撃位置および超音波による衝撃 損傷計測結果と比較する。		
0	統合化AE センサネット ワークによる実用衝撃	達成目標	実用時と同等なノイズ環境下において、AEセンサネットワークにより、AE発生位置を精度1cm以下で特定できることを実証する。		
2	負荷の同定	検証方法	8個の AE センサからなる衝撃負荷検知シス テムのアウトプットである衝撃負荷の大きさ および位置を、実際に与えた衝撃ハンマーの値 と比較する。		
3	分布型 BOTDR センサ 広領域系分布測定	達成目標	BOTDR センサシステムにより、胴体構造全体 にわたる広範囲の歪を、精度100 μ ε (マイ クロ・ストレイン)以下で計測できることを実 証する、		
3	应 顷 残 亚 万 币	検証方法	BOTDR システムの出力解析結果をデモンストレータに別途貼付した歪ゲージ出力および FEM 解析結果と比較する。		
4	炭素繊維の導電性を利 用したセンサ	達成目標	最大 歪検出型スマートパッチにより5000 με(マイクロストレイン)以下の最大 歪を検 出できることおよび 累積損傷型スマートパッ チにより負荷サイクル数を検出できることを 実証する。		
	(スマート・パッチ)	検証方法	最大歪検出型スマートパッチでは、デモンスト レータに貼付した歪ゲージ出力と比較する。累 積損傷型スマートパッチでは、別のモデル部材 で検証する。		
5	SMA 箔を用いた損傷 制御	達成目標	複合材構造に埋め込んだ形状記憶合金により、 損傷の発生・進展を抑制できることを実証す る。		
0	ում իստի	検証方法	CFRP 単体パネルおよび SMA を埋め込んだ CFRP パネルをデモンストレータ下面に取り 付け両者の損傷発生・進展状況を比較する。		
6	低コスト RTM 一体成形 パネルの知的成形	達成目標	光ファイバセンサを埋め込んだ CFRP 構造部 材を成形し、含浸、センサおよび出力コネクタ が良好な状態であることを実証する。		
6		検証方法	概観検査、超音波検査によりφ5mm 以上のド ライスポットがないことを検証する。また、光 ファイバセンサと歪ゲージ出力を比較する。		
7	騒音・振動の低減	達成目標	アクティブアダプティブ構造を適用すること により、減衰係数を20%以上向上できること、 ならびに、騒音レベルを3dB以上軽減できる ことを実証する。		
7	0 A D D D D D D D D D D D D D D D D D D	検証方法	デモンストレータに騒音・振動を負荷し、制御 ON および OFF 状態における減衰係数あるい は騒音レベルを比較する。		

表 1.1.1-1 デモンストレーション・テーマの達成目標と検証方法



図1.1.1-1 デモンストレータ試験計画

(1)試験全般;) 試驗目的			
1/ 11/16/11/2 11/2 11/2 11/2 11/2 11/2 1	シュトレータ 供封か	* 1- 7-1- *	ス計略な通じて久痛く=7.
航空機胴体角垣を快搬したナイ・	ノイトレーン決選を	や (へ が) り	の民気を回して白種くたく
ニタリング手法の有効性を検証する	S .		
 試験方針 			
試験は以下の基本方針をもとに言	計画/立案する。		
a) 全般			
①航空機胴体に生じる荷重で引	重要となる胴体曲い	げ荷重お	よび内圧荷重を模擬した負
形態とする			
②各デモンストレーションテー	-マの評価を目的と	1 4 2	
③各デモンストレーションテ-	-マの試験結果は-	一般的に	も理解し易いよう表示の仕
等を配慮する			
④試験期間および試験費用をま	5慮した効率的な記	武騄方法	を計画する
b)試験装置			
①試験装置は負荷される荷重に	こ対し十分な静強度	度および	疲労強度有するものとする
②計測装置は各個別評価試験に	こおいて共通使用で	でき効率	化が図れるよう配慮する
③破壊試験を想定した装置の副	殳計は行わない		
④試験装置及び付帯設備額は、	作業性、安全性、	美観等	に留意して計画する
c) かの色			
①試験は安全第一とし十分なま	安全対策に努める		
②試験で想定外の不具合が生し	じても対処できるよ	よう体制	およびスケジュールを検討!
ておく			
③試験装置の他に計測モニタ月	用ブースを設ける		
iii)試験仕様			
a)供試体			
デモンストレータ試験で使用す	する供試体を表 1. 1	1. 2-1 KC	जर मे 。
表 1. 1. 2-	-1 デモンストレー	-夕試験	供試体
名称	网	数量	備考
航空機胴体構造デモンストレ	L L E		φ1.5m×3m CFRP 構造
- 夕供試体(仮称)	1.D.U.	4	H13.11 出図予定
b) 荷重条件 航空機嗣休に生じ得ろ描面と1	、 より、 たので、 などので、 などので、 ないので、 な	指 す 名	拍すべ
処日返留谷にHつおるち単つ(〇間休由げ棺曲	つこ マーク 手子	L H H	ە ى. د. Ini.

1.1.2「損傷検知・損傷抑制」デモンストレータ試験

c)

U胴体曲び何里 ②胴体内圧荷重 試験環境条件 試験実施時における環境条件は、常温常湿とする。

d) 試験日程

試験日程を表 1.1.2-2 に示す。

			平成	14年			平成15 年
	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月~
1. 準備	◀						
2. 試験			◀				
3. 評価/まとめ						-	

表 1.1.2-2 試験日程

e)試験実施場所

試験実施場所は下記とする。

・三菱重工業(株)名古屋航空宇宙システム製作所 大江工場 複合材構造試験場 f) デモンストレーション・テーマ項目

デモンストレータ試験で評価する各デモンストレーション・テーマの項目を、表 1.1.2-3 に示す。

	1		r 1-1 2-	
No	分類	デモンストレーション・テーマ評価内容	評価部位	担当会 社
1	衝撃リアルタイム	埋め込み型光ファイバセンサによる衝撃損 傷検知	上面パネル	KHI
2	検知	統合化 AE センサネットワークによる衝撃 損傷検知	側面パネル	EADS
3		分布型 BOTDR センサ広域ひずみ分布計測	側面パネル	MHI
4	構造損傷探知	スマートパッチによる負荷ひずみ最大値検 出	下面パネル	東レ
5	損傷進展制御	SMA箔を用いた損傷進展制御	下面パネル	FHI
6	成形モニタ/制御	低コスト RTM 一体成形パネルの知的成形	隔壁	IHI

表112-3 各デモンストレーション・テーマ内容

iv)試験装置

a) 架構

図 1.1.2・1 に架構の主要構造の概要を,図 1.1.2・2 に試験装置(負荷関連)の全体計画 図を、それぞれ示す。架構および負荷治具の計画は、以下の設計方針に基づき実施した。

①供試体負荷荷重

・曲げ荷重^{*)}:343,000N(35ton) *)供試体端部せん断荷重値

·内圧 : 0.75気圧

②強度設計基準

強度(安全率:γ)は以下の値を目標に計画した。

・負荷系部位(架構/負荷部/点検孔部位): $\gamma = 8$ 以上

・その他の部位(作業床/ビーム、支柱/自重補正部位等): γ = 3 以上
 ③架構構成

架構は支持ベース、反力支持架台、供試体固定面板及び点検扉より構成される。供試体は、図 1.1.2・1 に示すようにフロアより約2.25mの位置に片持ち状態で固定する。 また、負荷荷重の反力等は架構全体で取るよう計画した(内部バランス様式)。



図 2-1 架構主要構造概要

④負荷要領(曲げ荷重)

曲げ荷重は、供試体端部より0.8mの中心上に負荷治具を介して2コの油圧サーボア クチュエータで負荷するよう計画した(負荷方向は上向き:アクチュエータは押し側)。

⑤負荷要領(内圧)

内圧負荷は、工場エアー(乾燥エアー,フィルター使用)を規定圧に制御しす計画と した。また供試体内に、発砲スチロール等の塊(球状、ブロック等)を詰込んで容積を かせぎ、効率化を図ることとした。

⑥作業床

作業床は、各個別評価試験時の作業区域や作業性を考慮し、供試体の回りを囲むよう に①両側面②前面③天井面にそれぞれ配置した。

両側面の片側(計測モニター室側)は試験時の供試体挙動等を監視できるよう作業床全体が移動(格納)出来るよう計画した。また、天井面に設置した作業床は、に設置した。

また、支柱の位置並びに数はガウンタウエイトを吊り下げる位置(試験時/作業準備時 等に極力邪魔にならぬような場所)や防護壁の基礎支柱として利用することを考慮して 計画した(支柱2ケは床にアンカーボルト止め)。 ⑧点検孔

供試体内部の点検等を実施するために供試体背面(図 1.1.2-2 中 VIEW A-A 参照) に点検孔(扉付,大きさ:800mmx600mm)及び昇降ステップを設けた。

⑨安全対策

想定外の破壊(特に内圧負荷時)による安全性を確保するため、架構周囲に破壊片飛 散防止用の防護壁を設けるよう計画した(計画図には未反映)。

b)負荷装置

主な荷重負荷装置を表 1.1.2-4 に示す。各装置の仕様の詳細および具体的なメーカおよび型番等はH13年度に検討し決定する。

表 1.1.2・4 は共通器材(すなわち供試体曲げ荷重および内圧負荷に関わる器材)であり、 各個別評価試験で使用する専用負荷装置(衝撃付与装置等)については、1.1.2(1)v).-f) 項に記す。

No.	器材名称	主要仕様	台数	備考
1	油圧アクチュエータ	 ・定格容量:20ton ・ストローク:300mm ・制御方式:電気式サーボ 	2	 ・曲げ荷重負荷用 ・40ton アクチュエータ1本 で 負 荷 す る 可 能 性 有 り (H13 に決定)
2	油圧ポンプ	T.B.D.	1	・過般型とする
3	圧力制御装置	T.B.D.	1	・工場エアーを利用予定

表 1.1.2·4 荷重負荷装置

c)計測装置

主な計測装置を表 1.1.2-5 に示す。各装置の仕様の詳細および具体的なメーカおよび型 番等は H13 年度に検討し決定する。

表 1.1.2-5 は共通器材(すなわち供試体全体の計測に関わる器材)であり、各個別評価試 験で使用する専用計測装置(FBG 計測器等)については 1.1.2(1) v).-f)項に記す。

d)試験場

図 1.1.2・3 に試験場レイアウト計画図を示す。

①架構の設置

試験場所は三菱重工業(株)名古屋航空宇宙システム製作所大江工場複合材構造試験 場内南側とし、供試体長手方向を南北にして装置を設置した。また、装置の西側を器材 置場・試験準備エリアとして計画した。

②計測モニタ室/フリースペース

試験場内南西側(装置の西側面)に試験計測時のモニター室およびフリースペースを 組立方式(パネル構造)にて設置する(エリア;W2.4mxD12mxH2.6m)。

ア) モニター室は3区域に仕切る







図1.1.2-2 試験装置全体計画



VIEW A-A

荷負汀的贛準汀執同多田内ひよは重荷打曲本酮: スーイ魏結荷綱/荷員・

荷食习的籍丁ノ立蛇多五内びよな重荷钓曲补酮: トハーセントノイス・

話聴サースは以下の3ケースとする.

スーゼ親結(B

封
式
鏡
結
(
ν

。るも誠実多齢整愚競結ひよな事工勢な

参応席一の勧携寺現(の前端の支担の近前を室一や二子断指73よな置装鏈結の) の散張寺現、0六世コるも置張ゴ府県の支用の近前を室一や二子断指73よな置装鏈結

ぐ行き置いせく

モーマで 割野 mm002~mm001 土 末後式 の 野頭 瞬間の 等置 装 順 情 約 末 ()

6	<u> </u>	本モヨルを空下・	TBD	用録语
0		・ NOTE 型	הסז	
0		SMODNIM :SO •	uau	田田田立一学園市
,	$6 - \Gamma 4 6 - 6$	先 祛騒 帰 1(せ ぐ 干 ・	т	
2		・計測 CH 数: 16	L	田原持及一行的撞
9	器順情や节び値	・計測 CH 数: J	21	用所指用意/ か変/ そちび 健
S	ナ ャキズ	・計測 CH 数: \$0	9	用販指効変 4を6構
4	-406-4	・計測 CH 数: 300 以上	I	田յ城指型変/ももの構
6		mmð,mms:灵炎ー거·	aar	
5	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	ミーヤモ节び溶用水・	uan	
5	情田養	・定格容量: 100kPa	I	用嘶情丑内
		土以 SF%5.0±: 塑静・	7	
F	143-1	not02 : 量容格式・	G	1曲 */ イ ダート - ナ イ ム 当 映・
.oN	科各林器	新力要主	拨台	急 翻



1.1.2-6負荷ケ ł スとデモンストレ [Ý Ш V 41 マとの対応

- 252 ---

図 1.1.2-

ယ်

試験場レイアウト

b)試験荷重

①ストレインサーベイ

ストレインサーベイで静的に負荷する荷重の最大値を以下に示す。

・曲げ荷重^{*)}:343,000N(35ton) *)供試体端部せん断荷重値

・内圧 : 0.75気圧

②負荷/除荷試験ケース

負荷/除荷試験ケースで準静的に負荷する荷重の最大値を以下に示す。

・曲げ荷重^{*)}:343,000N(35ton) *)供試体端部せん断荷重値

・内圧 : 0.75気圧

なお、負荷/除荷の回数および荷重レベルの設定に関しては、デモンストレーションテ ーマ「SMA箔を用いた損傷進展制御」の成果を反映させる必要があるため、平成1 3年度に立案する詳細試験計画において設定する。

③衝撃試験ケース

試験で負荷する衝撃荷重に関しては、1.1.2(1) v).-f) 項を参照のこと。

c) 試験シーケンス

各試験ケースの実施順序は、以下の指針に基づき設定する。

①ストレインサーベイ

デモンストレータ試験開始前、負荷/除荷試験後、および衝撃試験後に実施し、「構造 損傷探知」および「成形モニタ/制御」のデモンストレーションに加えて、ひずみゲージ および変位計による供試体の健全性を確認する。

②負荷/除荷試験ケース

負荷レベルを除々に増加させながら供試体への負荷/除荷を繰り返し、「損傷進展制御」 のデモンストレーションを実施する。

③衝撃試験ケース

デモンストレータ試験の最後に実施し、「衝撃リアルタイム検知」のデモンストレーションを行う。

各負荷ケースの実施順序を図 1.1.2-4 に示す。検査については、e)項で詳しく記す。



図 1.1.2-4 負荷シーケンス

d)計測

ストレインサーベイにおける供試体健全性評価、および負荷/除荷試験ケースにおける供 試体異常検知に供する共通計測項日について示す。

①ひずみ/変位計測

ひずみゲージの貼付位置および変位計取付位置は、以下の指針に基づき計画を立案する。

- (ア) ストレインサーベイ
 - ・静的ひずみおよび静的変位データを取得する
 - ・計測 CH 数は最大 300ch とする
 - ・供試体全体の応力(ひずみ)サーベイが可能となるよう考慮する
 - ・リングが取り付く前後端部近傍は詳細に計測できるよう計画する
- (イ) 負荷/除荷試験ケース
 - ・動的ひずみおよび動的変位データを取得する
 - ・計測 CH 数は最大 11ch とする
 - ・ストレインサーベイで取付けたゲージおよび変位計を流用する
 - ・ストレインサーベイの結果から最終的にモニタするひずみ/変位位置を決定する
- (ウ) 衝撃試験ケース
 - ・ひずみ/変位の計測は原則行わない(試験前後のストレインサーベイで確認)
 本方針に基づき計画したひずみゲージおよび変位計の取付案(ストレインサーベイ)を以下に示す.
 - (A) ひずみゲージ
 - ・ストリンガ(一般部): 28本×6ベイ×1ch=168ch
 - ・ストリンガ(リング近傍):14本(上下面パネル)×前後端×2ch=56ch
 - ・フレーム: 5本×4ch=20ch
 - ・外板(リング近傍): 6枚(上下面パネル)×前後端×3ch=36ch
 - (B) 変位計
 - ・アクチュエータ変位: 2ch
 - •供試体負荷端部: 左右端鉛直方向 2ch
 - •供試体中間部: 下面鉛直報告 2ch

本取付案では、ひずみゲージと変位計の ch 数合計は 284 となる。残りは予備 とする。負荷/除荷試験ケースでは、これらの ch の中からモニタする 11ch を選 択する。

なお、ひずみゲージおよび変位計の取付位置の詳細については、H13 年度に確 定する。また、各デモンストレーションテーマ試験で必要となる局所的なひずみ および変位計測に関しては、f)項に記す。

②荷重計測

各負荷ケースにおいて以下の荷重値を計測する。

(ア)ストレインサーベイ

- ・アクチュエータ荷重:2ch
- ・差圧: 1ch

(各負荷ステップ毎の静的荷重値)

- (イ) 負荷/除荷試験ケース
 - ・アクチュエータ荷重:2ch
 - ・差圧:
 1ch
 (負荷/除荷時の動的荷重値)
 なお、衝撃荷重値の計測については、1.1.2(1) v).-f)項のデモンストレーション・テーマ試験計画に記す。

e)検査

供試体検査についての計画を表 1.1.2-7 にまとめる。なお、図 1.1.2-4 における「検 査」は本表の通常検査を指す。

No.	分類	検査内容	検査方法	実施時期
1	日常検査	変形、クラック等の有無	目視	日々の試験開始前後
0 通带绘本		変形, クラック等の有無	目視	冬計殿た
2 通吊俠宜	一世币快宜	初期損傷(剥離等)の進展	超音波探傷	台試験ケース於「時
	田母時於木	変形、クラック等の有無	目視	モニタゲージ、各種センサ等
3	共吊时快宜	層間剥離の有無	超音波探傷	で異常を検知した時
4	最終検査	デモンストレーションテ ーマ毎に損傷の種類およ びエリアの確認	破壊検査	全試験ケース終了時

表 1.1.2-7 供試体検查

f)デモンストレーションテーマ試験内容

下記のデモンストレーション・テーマ毎の試験内容詳細は基本設計報告書による。
①複合材料埋め込み光ファイバセンサによる衝撃損傷検知
②統合化AEセンサネットワークによる実用衝撃負荷の同定
③分布型BOTDRセンサ広領域歪分布測定
④炭素繊維の導電性を利用したセンサ(スマートパッチ)
⑤SMA箔を用いた損傷制御
⑥低コストRTM一体成形パネルの知的成形

(2)試験供試体

i)設計方針

損傷検知・損傷制御デモンストレータは、11年度の基本構想の成果に基づき、与圧荷 重および飛行荷重を受ける航空機胴体構造を模擬した複合材胴体構造とし、その中で各テ ーマのデモンストレーションが実施できるよう、基本設計の方針を定める。デモンストレ ータの基本設計方針を以下に示す。

a) 全般

ア)図 1.1.2-5 に示すような航空機胴体を想定した従来構造に、スマート構造システムを 適用した構造様式・寸法諸元とする。実大構造でのデモンストレータではコスト高となる ため、胴体構造を模擬できる範囲で、コストを最小限に抑えられるようなスケールモデル とする。

イ)各テーマのデモンストレーションを実施するに当たり、想定する胴体構造から構造様 式を変更する必要がある場合には、その範囲を最小限に抑える。

ウ)スマート構造システムの適用範囲外では、汎用材料を使用した構造とし、製造及びデ モンストレータ試験でのリスクを低減する。防食処理は通常航空機で行われているような 処置を行うものする。

b) 強度 · 剛性

ア)強度・剛性については、デモンストレーション試験にて付与される荷重に対し、十分 な強度を有する構造とする。

イ)標定部構造の安全率を1.5、結合部及び支持構造の安全率を2とし、標定部外で強度上の標定とならないよう配慮して設計する。

c)インターフェース

デモンストレータは、各テーマの担当会社が製造する構造を組み立てるため、インター フェースについては、以下のような方針で設定する。

①各パネルの担当会社がそれぞれサブ組立できる構造様式とする。

②組立時に発生する隙間は適宜シム調整する構造様式とする。

③穿孔、組立時において、センサに損傷を与えないようなインターフェース設定とする。 ④着脱パネル以外は永久結合とし、気密はシールで確保する構造様式とする。





ii) 設計仕様

a) 寸法諸元の設定

デモンストレータは航空機胴体を模擬した構造とし、その中で各テーマをデモンストレ ーションする。実大の航空機胴体を模擬しようとすると、最低でも直径約2.5m以上と なり、費用が嵩む。そのため、デモンストレーションの目的を達成し得る範囲で、スケー ルモデルを考えてコスト低減を図ることが必要である。

現有の胴体構造は一般的にスキン-ストリンガ構造で、外板は約1mm程度の薄板構造 である。外皮構造部で、最も曲率の影響を受けるのは、機軸方向圧縮荷重下での挙動であ る。圧縮荷重が作用するような場合には、外板では僅かの荷重しか受け持たず、大部分を ストリンガ周辺構造で受け持つことになる。曲面パネルの場合、その曲率により荷重分担 が異なってくる。したがって、デモンストレータではその分担比率に影響がない程度に胴 体径を設定する必要がある。

薄肉曲面を持つ板場は、その曲率のために、ストリンガとは無関係に、曲率のみによる 耐荷力を持つと考えられる。その耐荷応力を越えると、外板は座屈して曲率の効果を失い、 有孔幅のみ荷重を受け持つことになる。胴体径と有効幅の関係を図 1.1.2-6 に示す。直径 1.5m程度であれば、実機胴体と同様な有効幅となり、荷重伝達様式も同様になるため、 十分実機を模擬できると考える。

与圧荷重は、外皮構造のフープテンションとして受け持ち、胴体径が変化すると、その 応力も比例して変化する。しかし、その応力分布は一様であり、構造様式への影響はほと んどない。

以上のような考えに基づき、デモンストレータ胴体径は1.5mとする。(表 1.1.2-8)



図 1.1.2-6 胴体径と有効幅の関係

隔壁部アクセス孔	胴体長	胴体径
0.6m×0.6m	3.0m	φ1.5m

表 1.1.2-8 デモンストレータ寸法諸元

b)供試体仕様

デモンストレ ション実施内容及び実施領域を表 1.1.2T 9 に示す。

No σī 4 ω \sim ⊢ 成形モ 損傷進展制御 構造損傷探知 タイム検知 衝撃リアル 分類 11 Ŕ / 制 低コスト 分布型 傷検知 の同定 形状記憶合金箔を用いた損傷制御(*2) ŋƒ) (*2) 統合化AEセンサネットワークによ 炭素繊維の導電性を利用したセンサ(スマートパ 布测定(*1) 埋込み型光フ Ψ ЧI 0 T R きく TM一体成形パネルの知的成 DRセンサ広領域ひずみ分 \checkmark レムズ イバセンサによ ſ ション内容 る実用衝撃負荷 Ś 衝撃損 側面パネル 거 F 面パネ 外付け 外付け 面パネル 部位 1× 担当会 Ţ д ΜН КΗ 茰 \geq Η $\overline{}$ \Box н Ц S 卒

表 1.1.2-9 デモンストレーション内容

(*1)側面パネル標定部で最大/最小ひずみ差を約3000 u 発生させる。

6

遛

形 (* 3)

藉闔

Γ

Π

_

(*3) 荷重負荷側の隔壁にはデモンストレーション用の区画(700mm×700mm) (*2)下面パネルデモンストレーション標定部で最大ひずみ約5000μを発生させる。 ŝ を設け、取り外し可能な構造として、複数のデモンストレーションが行えるようにす

c) 基本構造

N デモンストレー タ構造は設計方針に従い、 下記の仕様を満足する よう設計す en Gt. 9 \cap Ъ

①周方向については、表1.1.2-9の各テーマのデモンストレーションに合わせて分割す その際、1.1.2(2)- i)-c)項のインターフェースを考慮し て設定する。 evi

②各パネルについては、各テーマのデモンストレーション、成形時のリスク低減等必要に 応じて、長手方向に分割しても良いこととする。

③デモンストレータの内部構造にはアルミ合金を使用し、ア 0 \mathcal{P} Ξ FRPの結合面には、GFRPを積層 SまたはTiのボルトを使用する。 $\overline{}$ て電食を防止 é アルミ合金フレートる。複合材と イームと接触する この結合には、C

④メタル部品に 合材部分に ついては表面処理は行わない。 ついてはプライマ塗装 (外表面は上塗り塗装 ۶łł で実施) Ч るが、 パネルの

⑤デモンストレーション試験実施のため、デモンストレータ内部に作業用の足場を設ける ものとする。

⑥隔壁部に取り付けるパネルは、試験中内部へアクセスするため、着脱可能とする。
⑦デモンストレータの長手方向端部には隔壁を兼ねた荷重導入部およびデモンストレータ

し、ビンストレージのは150回動品には開催されない。重要ス部43よいアセンストレージ を支える支持部を有するものとする。

iii) 主要諸元

図 1.1.2-7 にデモンストレータ概要図を、表 1.1.2-10 にデモンストレータ構造の主要 諸元を示す。



図 1.1.2-7 デモンストレータ概要図

胴体外径	φ1.5m				
胴体長	3.0m				
隔壁部アクセス孔	0.6m×0.6m				
隔壁パネル	0. $7 \text{ m} \times 0$. 7 m				
許容負荷能力	内圧:0.75気圧、 剪断荷重:35ton				
パネル構造様式	複合材スキンーストリンガ構造				
発生最大ひずみ (曲げ荷重・与圧作用 時)	- 下面パネル : 約 5000μ 側面パネル : 約 3400μ(下方) 上面パネル : 約-2700μ 隔壁パネル : 約 1000μ				
デモンストレータ重量	胴体構造 : 141kg (隔壁、負荷金具、支持金具含む全重量: 1320kg)				

表 1.1.2-10 主要諸元

iv)構造様式

①胴体外皮構造

胴体構造の構造様式には、図 1.1.2-8 に示す外板、縦通材およびフレームで構成される スキン-ストリンガ構造、縦通材がないシンプルなモノコック構造、表皮とコアで構成さ れるサンドイッチ構造がある。モノコック構造は、曲率の大きい胴体では、圧縮側での座 屈を防止するため厚板構造となり、構造効率が悪くなる。複合材を使用したサンドイッチ 構造は、近年のビジネス機に適用されている例もあるが、結合が複雑となり、また内表面 の損傷確認が困難となるため、試験には不向きである。スキン-ストリンガ構造は、金属 構造では実際の航空機で一般的な構造であり、外板およびストリンガを複合材に置き換え ることが可能である。

複合材胴体構造としては、ハニカム構造またはスキン-ストリンガ構造が考えられるが、 今回のデモンストレータでは、知的システムを導入した構造の点検性等に重点を置い てスキン-ストリンガ方式を採用する。



図 1.1.2-8 胴体構造様式

②隔壁構造

剪断荷重負荷金具を兼ねた胴体端部の隔壁は、デモンストレータの評価対象外であるため、スチールを使用した厚板構造として、強度余裕を十分に確保する。胴体構造とは永久結合し、気密はシールで確保する構造様式とする。隔壁の中央にはアクセス孔を設け、試験時に内部へアクセス出来るようにするとともに、デモンストレーション・パネルが取り 付けられるような構造とする。

v)構造概要

基本設計において設定したデモンストレータを表 1.1.2-11 に示す。 (構造の詳細は基本設計報告書 付録 4.1.2.7 供試体計画図面 参照)

表 1.1.2-11 デモンストレータ

供試体部品番号	名称
T – 0 5 3 3 3 – 1	デモンストレータ組立 次世代委託研究 知的材料・構造システムの研究 デモンストレータ試験 供試体基本設計図

a) 全般

①構成

図 1.1.2-9 にデモンストレータ構造概要図を示す。デモンストレータ構造は複合材外板 とストリンガとアルミ合金フレームからなるビルドアップ構造である。ストリンガは約1 50mm~200mmピッチで配置し、外板とは一体成形または2次接着される。アルミ 合金フレームは機械加工部品とし、500 mmピッチで配置して外板とファスナ結合 する構成とした。ストリンガ・ピッチ及びフレーム・ピッチは、表 1.1.2-12 に示すよう な航空機胴体の寸度を参考に設定した。

②分割

パネルの分割位置は斜め45°として、上下面及び側面パネルを均等に分割する。各担 当会社のインターフェースを精度良く取り、リスクの少ない確実な組立方式とするため、 パネルの分割位置に合わせて内部構造及び負荷金具、支持金具も分割し、パネル、フレー ム、負荷金具および支持金具をサブ組立する構造とした。

③上面パネル

上面パネルでは、ST500~ST2500 の範囲を標定部とし、外板内部の周方向およびスト リンガに沿った前後方向に光ファイバセンサを埋め込む。外板とストリンガは、成形容易 化のため、一体成形パネルとする。前後方向には ST1000 及び ST2000 の位置で分割し、 突き合わせの結合として、気流方向の外表面を滑らかにする。側面との結合はセンサの取 り出しを考え、上面パネルが内側となるようにして、旅客機胴体で一般的に使用されてい るラップ結合とする。(図 1.1.2-9 SECT B) ④側面パネル

側面パネルでは、BOTDR センサによる広域ひずみ分布計測を行うため、ST400~ST. 2400 に光ファイバを取り付ける。光ファイバは、側面パネルの中で高いひずみの出る上 方および下方に分けて取り付け、より広範囲のひずみ分布を計測する。パネルは成形容易 化のため、外板とストリンガの一体成形の一枚パネル構造とする。 ⑤下面パネル

下面パネルでは、形状記憶合金箔を用いた損傷制御およびスマートパッチを用いた歪み 検出を行うため、損傷発生のひずみレベル約 5000 µ が必要となる。ST 1 500~ST 2 500 の範囲を標定部としてその前後を分割し、標定部の外板内部には、形状記憶合金を埋め込 む。成形中は形状記憶合金を保持し、接着強度を確保する必要があるため、外板単独で成 形してリスクを低減する方が望ましい。このため本供試体では、別々に成形した外板とス トリンガを 2 次接着で組立てる方式を採用する。ストリンガと外板は上面パネルと同様、 前後方向の分割は、突き合わせの結合とし、側面との結合は、上面パネルが内側となるよ うなラップ結合としている。(図 1.1.2-9 SECT C) ⑥隔壁パネル

負荷側の与圧隔壁の一部を、取り付け、取り外しが可能なパネル構造として、与圧荷重 によりデモンストレーションが行えるようにしている。パネルは隔壁にボルトで結合し、 気密はガスケット・シールで行う方法とする。

機体	胴体径(m)	外板板厚(mm)	ストリンカ゛・ ヒ゜ッチ (mm)	フレーム・ピッチ(mm)
I - 1.8.8	3.5	1.0	150	480
B707	3.7	1. 0	230	510
DC = 8	3.7	1.3	180	510
C = 1.4.1	4.3	1.3	150	510
DC = 10	6.0	1.8	$1 6 5 \sim 2 0 0$	510
D 7 4 7	6.5	1.8	190~230	510
デモンストレータ	1.5	1. $6 \sim 4.0$	$1 5 0 \sim 2 0 0$	500

表 1.1.2-12 旅客機胴体構造のストリンガ・ピッチ及びフレーム・ピッチ





SECT B

SECT C

図 1.1.2-9 デモンストレータ構造概要図

vi) 強度 · 剛性

a) 強度の方針

試験にて付与される LMT 荷重(剪断荷重 35ton+内圧 0.75 気圧)に対し、標定部構造の安全率1.5、結合部及び支持構造の安全率2を満足させる。また、LMT 荷重に対して座屈させない方針とする。

b)有限要素モデル

解析モデルを図 1.1.2-10 に示す。左右対称構造であることを考慮し半裁モデルとした。 各 CFRP スキンと隔壁は 2 次元板要素、ストリンガー・フレームは梁要素としてモデル化 した。

CFRP スキンの板厚はフレームとストリンガに囲まれた区間毎の平均板厚を入力した。 ただし、隔壁とフレームはモデルの単純化のために剛体とした。

モデルの支持面(STA 3000の支持架構部)全体を6自由度拘束とし、半裁モデルの切断 面は対象の拘束条件を与えた。

外力として、STA-800 の位置に上向き剪断力 17500kgf(半裁モデルのため試験荷重の 半分)を付与し、同時に内圧 0.75 気圧を各パネル(隔壁も含む)に付与し、内部荷重解析 を実施した。



図 1.1.2-10 有限要素モデル

c) 強度検討結果

FEM解析により求めた、LMT荷重負荷時に作用する歪み分布、および主要部位の安 全余裕一覧を図 1.1.2-11 に示す。

強度検討の結果、十分な安全余裕を有しており、デモンストレータ構造の強度成立性の あることを確認した。なお、デモンストレータ全体での強度標定は、上面パネルスキンの 座屈(M.S.=+0.30)である。

また、繰返し荷重に対しては、LMT 荷重の付与 10,000 回に耐荷する能力を有していることを確認した。



図 1.1.2-11 静強度安全余裕および発生歪一覧

d) 剛性検討結果

試験 LMT 荷重負荷時の最大変位を FEM 解析により求めた。 図 1.1.2-12 に示す様に最大変位は剪断荷重負荷位置において、最大約 30mm(LMT 剪断 荷重負荷時)であり、十分な剛性を有することを確認した。



図 1.1.2-12 最大変位および部位

1.1.3「騒音・振動低減」デモンストレータ試験

(1)試験全般

i)試験目的

航空機を想定した胴体構造物にアクティブ・アダプティブ構造を適用し、振動・機内騒 音軽減効果を実証することが目的である。

ii) 試験方針

本供試体により振動・騒音制御を行う周波数範囲は以下の値とする。

 $\cdot 0 Hz \sim 500 Hz$

本範囲とした理由は以下による。

- ・機体構造を加振することにより機内へ入ってきた航空機騒音に対し、現状は、主に 吸音材の装着で対応している。
- ・図1.1.3-1に示すように、吸音材の吸音率は、加振源である構造物との距離 をある値以上とって装着しなければ、約500Hz以下で吸音率が急激に低下する。



図 1.1.3-1 多孔質吸音材料の吸音特性 出典:西山他,音響振動工学,(1979),217,コロナ社.

- ・しかし、機内容積を確保する必要がある航空機では吸音材と構造の間を大きくとる 事は不可能であり、吸音材では 500Hz 以下の低周波数領域の機内騒音低減に対応す ることは困難である。
- ・よって、ここでの振動・騒音制御デモンストレータ試験では現状機内騒音低減が困

難な 0~500Hz までの周波数範囲を対象に試験を実施することとする。 なお、航空機実機の機内騒音例を図 3.1.3・2 に示す。本図から、本試験で制御対象 とする 500Hz 以下で音圧レベルのピークがあることがわかる。



図 1.1.3-2 航空機実機の機内騒音 周波数特性

出展: T.N.Christenson 他, EXPERIMENTAL LOCALIZATION OF NOISE ENTRY POINTS INTO AN AIRCRAFT CABIN, AIAA-99-1835

iii)試験仕様

振動・騒音制御デモンストレータとして製作する円筒形状複合材構造供試体(構造に PZT センサ/アクチュエータ装着)に対して外部から振動を負荷し、構築した制御システム によって、装着されているセンサからの構造振動計測データにより構造振動を抑制するよ うに PZT アクチュエータを駆動する。そのときの供試体構造の振動データと、同じ振動を 負荷し制御システムを用いない時の振動データを比較し、3.1.2 項の達成目標①「制御対象 とするモードの減衰係数を 20%程度以上向上させる」が達成されていることを実証する。 また、同じ供試体に対して外部から騒音を負荷し、構築した制御システムによって、装 着されているセンサからの計測データにより供試体内部騒音を軽減するように PZT アク チュエータを駆動して構造振動を抑制する。そのときの供試体内部の音響データと、同じ 騒音を負荷し制御システムを用いない時の音響データを比較し、3.1.2 項の達成目標②「騒 音レベルを 3dB 以上軽減させる」が達成されていることを実証する。 iv)試験項目

基本計画における目標の達成を実証するため、表 1.1.3-1 に示す 4 項目の試験を実施する。

表 1.1.3-1 振動・騒音制御デモンストレータ 試験項目

試験項日	概要
振動特性データ取得 試験	 ・加振器で供試体へ振動負荷を行い、そのときに取得した加振力及び供試体構造の振動加速度データからモーダル解析により供試体の振動特性(固有振動数/振動モード/減衰係数)を求める。 ・求めた供試体振動特性は、それまでの制御則設計で設定した PZT センサ/アクチュエータ配置の確認/見直し及び制御則のチューニングに用いる。
振動制御試験	 ・PZT アクチュエータによる振動・騒音制御システムを作動 させた場合及び作動していない場合で、加振器により供試 体へ振動負荷を行い、そのときに取得した加振力及び供試 体構造の振動加速度データからモーダル解析により供試体 の振動特性(固有振動数/振動モード/減衰係数)を求める。 ・求めた制御システム作動/非作動時の減衰係数を比較して、 制御対象とするモードの減衰係数が 20%程度向上してい ることを示す。
騒 音 制 御 試 験 I	 ・無響室において PZT アクチュエータによる振動・騒音制御システムを作動させた場合及び作動していない場合で、スピーカーにより供試体外部から騒音負荷を行い、供試体内部の音圧レベルデータを取得する。 ・求めた制御システム作動/非作動時の供試体内部音圧レベルを比較して、その音圧レベルが 3dB 以上軽減していることを示す。
騒音制御試験Ⅱ	 ・反響室において PZT アクチュエータによる振動・騒音制御システムを作動させた場合及び作動していない場合で、スピーカーにより供試体外部から騒音負荷を行い、供試体内部の音圧レベルデータを取得する。 ・求めた制御システム作動/非作動時の供試体内部音圧レベルを比較して、その音圧レベルが 3dB 以上軽減していることを示す。

(2)試験供試体

i)設計方針

振動・騒音制御試験の供試体である本デモンストレータを設計するにあたっては、以下 をその設計方針とする。

①デモンストレータの構造は小型旅客機の1/3程度の航空機胴体を想定したものとする。

- ②本試験を先進的なものとするため構造材料は主に複合材料とする。ただし、製作コスト を押さえるため、金属材料も併用する。
- ③適用するアクティブ・アダプティブ技術は要素研究「アクティブ・アダプティブ構造技術の開発 機内騒音軽減技術の研究」の成果を反映する。
- ④本デモンストレータの基本的な形状寸度や構造様式は、損傷検知・損傷抑制デモンストレータに合わせる。
- ⑤他の設計方針や設計仕様を満足した上で、なるべく低コストで製作できるよう考慮する こと。
- ⑥本供試体で考えられる荷重は、試験時の振動・騒音負荷以外は輸送時やハンドリング時のもののみである。よって、設計にあたっては、試験に必要な機能や性能を満足するように仕様を設定した後、必要な静強度を有していることを確認することとする。その際の安全率は2を用いる。
 - これらの設計方針のうち、①~③は以下の文書に基づくものである。
 - ・「知的材料・構造システム」産業科学技術研究開発基本計画(NEDO)
- ・「知的材料・構造システムの研究開発」デモンストレータ試験計画(RIMCOF) ii)設計仕様

デモンストレータの設計仕様を以下に示す。

①形状寸度は上記(2)i)項の設計方針①や④を受けて以下のようにする。

- ϕ 1.5mimes3m
- ②3.1 項に示す振動・騒音制御試験に適用できること。

③構造様式や各部の構成/結合様式は現状の小型旅客機を考慮したものとすること。

iii) 主要諸元

i) 項の設計方針やii) 項の設計仕様に基づき設定したデモンストレータの主要諸元を 図 1.1.3-3 及び表 1.1.3-2 に示す。

これらの仕様は、デモンストレータと航空機実機想定モデルの振動解析結果より、実機想 定モデルの構造や機内音響振動の振動特性(固有振動数及び振動モード)を考慮し、デモ ンストレータの振動特性をその構造部材寸度や配置により調整することにより設定した。 この設定の詳細については次項で述べる。



図 1.1.3-3 振動・騒音制御デモンストレータ概要

	項目	<u> </u>			<u></u>	11.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1		
1.	1. 構造様式					・ スキン・ストリンガ・フレーム構造。		
						・ 端部はバルクヘッドで塞ぐ。		
2.	構造材料	胴体部	スキン			· C/Ep複合材(T300/P3060)		
			ストリンガ			· C/Ep複合材(T300/P3060)		
	ļ		スプライスブレート			・ C/Ep複合材(T300/P3060)		
	1		フレーム		······	・ Al合金(7075)		
		バルクヘ				· AI合金(7075)		
Э.	. 振動·騒音制御対象周波数範囲					• 0~500Hz		
4.	各部寸度	胴体部	外形形状			・ 円筒形状々1500×3000mm		
			スキン		PLY数	• 16PLY		
					板厚	• 2mm		
		ストリンガ 形状			・ ブレード 形状 (逆T 字形状)			
ļ	I			ウェブ	PLY数	• 16PLY		
	ł				板厚	• 2mm		
1	1				高さ	• 25mm		
				フランジ	PLY数	· BPLY		
					板厚	• 1 mm		
					巾畐	• 40mm		
				配置		・ ビッチ:円周方向4等分		
			フレーム	形状		・ □の字形状		
				ウェブ	板厚	· 2mm		
					高さ	• 50mm		
				フランジ	板厚	• 2mm		
			,		高さ	• 30mm		
				配置		・ ビッチ:機軸方向750mm		

表 1.1.3-2(1/3) 振動・騒音制御デモンストレータ仕様(主要諸元)

表 1.1.3-2(2/3) 振動・騒音制御デモンストレータ仕様(主要諸元)

	項目		<u></u>		,		仕様
4.	各部寸度	胴体	構成/結合	様式	<u></u>		・スキン周方向4分割(上下左右のストリンガ直下で分割)。
	(続き)	(続き)					・ 突合せによるスプライス結合。
							・ ストリンガ~スプライスプレート~スキン間をファスナ結合。
							・ ストリンガとスプライスプレートは複合材一体成形。
							・ ファスナは3/16、CRES。スキン外表面に出るものは皿頭。
							・ スキン結合部のファスナ列は4列。
							 電解腐食防止のため、AI合金製のフレームは表面処理としてアノダイズ+ブ ライマ1回塗り+エナメル2回塗りを施す。また、C/Epの接触面には#120ガラ スを一層コキュアする。
		バルク	外形形状				• 円錐台形状頂角120°
		ヘッド					· 台円直径250mm
			台円部	直径			• 250mm
				スキン	板厚		• 10mm
				スティ	形状		・ ブレード形状(フランジなし)。
				フナ	ウェブ	板厚	• 10mm
						高さ	· B0mm
					配置		・ 半径方向90°ずつ(十文字配置)。
			円錐部	スキン	板厚		• 10mm
				スティ	形状		· 逆L字形状。
				フナ	ウェブ	板厚	• 10mm
						高さ	• BOmm
					フランジ	板厚	• 10mm
						巾畐	• 30mm
					配置		・ 半径方向90° ずつ4EA及び周方向等間隔で2EA。

- 271 -

表 1.1.3-2(3/3) 振動・騒音制御デモンストレータ仕様(主要諸元)

	項目					T	仕様			
4.	各部寸度	バルク	構成/結合様式 バルクヘッド自体			ŀ	台円部:スティフナとあわせて一体削り出し。			
	(続き)	ヘッド (続き)				•	円錐部:周方向に4分割。各部分をスティフナと合わせて一体削り出し。スティ フナ部分で各部分をボルト (Steel) 結合。 台円部と円錐部は、円錐部にフランジを設け、そこに台円部を合わせてボルト (Steel) 結合。 表面処理はアロジン処理。			
					バルクヘッド~胴体	ŀ	バルクヘッドにフランジを設けて胴体側フレームとボルト(Steel)結合。			
						ŀ	バルクヘッドは外側からのみのアクセスで胴体へ取付けられるようにする。			
		センサ	PZT	外形形状		ŀ	長方形形状(シングルコンターあり)			
		/アク 周方向長さ		ŀ	30mm					
		チュ	機軸方向長さ		ŀ	40mm				
		エータ 周方向曲率半径		ŀ	750mm					
			厚 さ		ŀ	0.5mm				
				配置/数量 			ストリンガとフレームで囲まれたパネル1ベイあたり9EA装着→9EA×16ベイ ×2(アクチュエータ用、センサ用)で144EA。フレーム上に3フレーム×12EA で36EA。計180EA。 スキン内面に配置。			
						ŀ	EA956(エポキシ接着剤)による接着。			
			その他	振動加速度センサ 歪ゲージ		ŀ	70EA			
			センサ			ŀ	30EA			
		-		マイクロホ	ン	ŀ	音圧レベル計測用。外部、内部合わせ22EA。			
							供試体内部への取付は、バルクヘッド台円部中央に孔を設け、そこに通した 棒に取付けることにより行う。			
5.	5. その他全般						供試体及びバルクヘッドにはハンドリング用(懸吊用)のハードポイントを設する。 胴体部のハードポイントはバルクヘッドと結合するフレーム 上に設ける。			
iv)供試体仕様の設定

a) 基本形状及び外形寸度

本デモンストレータは、航空機胴体を想定することにより外形形状を以下とする。

•供試体外形形状:円筒形状

また、外形寸法は、B737等の小型旅客機の 1/3 程度として以下の値とする(B737 の仕様を基本設計報告書の付録 4.2.1 項に示す)。

・供試体外形寸度: φ1500×3000mm

これらの設定は、i)項の設計方針①、④及び設計仕様①に基づく。

b)構造様式

本デモンストレータはi)項①や上記a)項に述べたように「小型旅客機の 1/3 程度の 直径を有する航空機胴体構造想定供試体」として製作するものであるが、供試体の構造様 式は、1.1.3(2)項④から、損傷検知・損傷抑制デモンストレータと同じく、現状の Al 合金 構造旅客機の主流様式である以下のようなセミモノコック構造を採用する。

・構造様式 :スキン・ストリンガ・フレーム構造

また、円筒形構造の端部はバルクヘッドを設けて塞ぐこととし、供試体外部と内部を構 造で完全に隔てて、供試体内部を航空機機内に見立てる。

c)構造材料

供試体構造の材料は、設計方針②により基本的に複合材料とするが、製作コストも考慮 して以下のようにする。

・スキン : C/Ep 複合材(T300/P3060)

・ストリンガ : C/Ep 複合材(T300/P3060)

・フレーム : Al 合金 (7075)

バルクヘッドについては、供試体質量の軽量化の観点から以下の材料とする iv)g)②項参照)。

・バルクヘッド : Al 合金(7075)

d) 複合材料の積層構成

デモンストレータに適用する複合材の積層構成は、デモンストレータとしては特に材料 に面内方向に異方性を持たせる必要もないので、擬似等方積層とする。

e)各部寸度

①胴体部スキン厚さ

本デモンストレータ試験は、現在、「知的材料・構造システムの研究開発」における要素 研究として実施している「アクティブ・アダプティブ構造技術の開発 機内騒音軽減技術 の研究」によって開発した技術を適用して行う。また、その「機内騒音軽減技術の研究」 で用いた構造要素供試体の PLY 数(擬似等方積層)は、航空機実機を考慮して設定した値 でもあるので、本デモンストレータのスキン厚さは、その構造要素供試体のスキン PLY 数 に合わせる形で以下の値とする。

 ・スキン板厚:2.0mm(16PLY疑似等方積層;[T300/P3060{東レ トレカ P3060B·12}])
 この値は、B737 相当の航空機実機の値(B737 で最小値 0.91mm(基本設計報告書 付録 4.2.1 項参照)、ただし Al 合金)と比べて大きいが、通常、複合材構造は、同 じ荷重条件で設計した Al 合金構造に比べて板厚は厚くなると考えられるので(複合) 材構造は座屈許容せず、さらに、圧縮強度は CAI 強度で決まるため)、定性的に妥当な値と考える。

なお、スキン板厚はこの板厚でセットし、供試体の振動特性を航空機実機相当の値 を睨んで調整するパラメータとしては、補強材の配置や寸度を用いることとする。 ②胴体部補強材(フレーム/ストリンガ)配置、形状及び寸度

(ア)設定方針

振動・騒音制御試験では航空機胴体を想定してデモンストレーションを行うので、デモ ンストレータの構造や内部音響の振動特性はある程度実機に近い方が望ましい。

しかし、デモンストレータのサイズは想定している小型旅客機の約1/3であるので、補強 材の寸度や配置を実機と同じ値にすれば構造の剛性は実機と比較してかなり高いものと なる。また、内部空間の大きさで振動特性が決まってしまう内部の音響振動については、 デモンストレータと実機ではその固有振動数は当然異なる。構造の剛性は、補強材の寸度 を小さくしたり配置ピッチを大きくしてある程度実機へ近づけることができるが内部音 響振動に関しては合わせることは不可能である。そこで、以下のように、局所的な構造の 固有振動数のみ合わせることとし、構造全体と内部音響の振動特性については、それらの 上下関係がデモンストレータと実機想定モデルで同様な状態になるようにする。

- A. フレームとストリンガの配置(ピッチ)は、それらで囲まれたパネル単体の固有振動数を、航空機実機を想定したパネルの固有振動数に合わせる形で設定する。
- B. フレームとストリンガの断面形状寸度は、デモンストレータ全体の構造と内部音響 の固有振動数の上下関係が、航空機実機を想定したモデルのそれらの傾向に近づく ように設定する。
- (イ)補強材配置の設定

上記(ア)項A.の方針に基づき、フレーム及びストリンガの配置を検討する。検討のため、デモンストレータ及び航空機実機想定モデルのパネルの固有振動解析を NASTRAN により実施する。解析条件を表 1.1.3-3 に、解析結果を図 1.1.3-4 に示す。本結果より、フレーム及びストリンガの配置ピッチを以下のように設定した。

- ・機軸方向長さ(フレームピッチ): 750mm
- ・周方向長さ(ストリンガピッチ):1178mm(直径 1500mmの円周4等分)

言+笛/		デエンフ	トレーク		航空搬宝楼
미开/ ^					加工版天版
	PNL001	PNL003	PNL004	PNL005	PNL102
R(mm)	750.0	750.0	750.0	750.0	1880
W(mm)	589.0	1178.1	1570.8	1178.1	228.6
L(mm)	750.0	750.0	750.0	500.0	508.0
t(mm)	2.0	2.0	2.0	2.0	0.914
材料	C/Ep	C/Ep	C/Ep	C/Ep	AI合金
周辺拘束条件	単純支持	単純支持	単純支持	単純支持	単純支持
要素分割					
L方向ピッチ(mm)	25	25	25	25	25.4
W方向ピッチ(mm)	25	25	25	25	25.4
備考	周方向	周方向	周方向	周方向	B737想定
	45°分。	90°分。	120°分。	90°分。	付録4.2.2.1
]	Lを500mm	項参照
				<u>へ変更。</u>	
		1	L		
↓ /~		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			
₹∽~~	- W		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		
t					
I	\land				
R/1	/ \ `	\ [í	
	<u>۱</u>				
		y			
ŕ	•				
・ 解析モデルの要素分	分割は、モデリ	レ全体で左右。	上下対称とする	る(ビッチの 端都	牧は
│ モデル端部の要素で	で吸収する)。				

表 1.1.3-3 パネル振動解析条件



図 1.1.3-4 パネルサイズに対する固有振動数の変化

(ウ) 補強材断面形状寸度の設定

上記(ア)項 B.の方針に基づき、フレーム及びストリンガの断面形状寸度を検討する。 なお、補強材の断面形状は一般の航空機で広く用いられている以下の形状とする。

・フレーム : コの字形状 →]

・ストリンガ :ブレード形状 →上

検討のため、デモンストレータと航空機実機想定モデルの構造振動及び内部音響振動に 対し、NASTRAN により固有振動解析を実施した。解析条件の一部を表 1.1.3-4 に示す (全ての解析条件については基本設計報告書 PP.81-83 を参照)。デモンストレータの補 強材断面形状寸度は、一般の航空機を考え、検討の初期値として以下の値を用いた。

・フレーム ;板厚:2mm、フランジ幅:30mm、ウェブ高さ80mm

・ストリンガ;板厚:2mm、フランジ幅:40mm、ウェブ高さ25mm

また、航空機実機想定モデルは、B737の機体寸度や構造部材寸度(基本設計報告書 付録 4.2.1 項参照)をもとに設定した簡易モデルである。

解析結果のうち固有振動数の算出結果を表 1.1.3-5 に示す。主な振動モードについては 基本設計報告書の PP.83-86 に示す。ここでの検討で注目した振動モードは以下の3種類 である。

 ①構造の最低次固有振動

②内部音響振動の機軸方向モードの最低次固有振動

③内部音響振動の半径方向モードの最低次固有振動

これらの固有振動数をデモンストレータと航空機実機想定モデルで比較すれば、その上下 関係はともに②①③の順序で大きくなっており、傾向は合っているといえる。ただし、デ モンストレータでは①と③の固有振動数が接近しているので、航空機実機想定モデルと同 じようにある程度離すこととし、補強材の断面形状寸度を変更する。フレーム及びストリ ンガの断面形状寸度をパラメータとしたときの NASTRAN によるデモンストレータ構造 の最低次固有振動数算出結果を図 1.1.3-5、-6 に示す。

本結果より、構造の最低次固有振動数はストリンガよりもフレームの断面形状寸度により大きく影響を受けることがわかる。よって、ストリンガの断面形状寸度は初期値のままとし、フレームの断面形状寸度のうちウェブ高さを 50mm とすることによって構造の最低 次固有振動数を下げることとする。

以上の検討により、デモンストレータ胴体部補強材の断面形状寸度は以下のように設定 する。

・フレーム ;板厚:2mm、フランジ幅:30mm、ウェブ高さ50mm

・ストリンガ;板厚:2mm、フランジ幅:40mm、ウェブ高さ25mm

計算ケース	AIR1 06	Ν
R(mm)	1880	$\mathbf{\Lambda}$
H(mm)	2490	
L(mm)	18000	
解析モデル		
要素分割(ピッチ)		
半径方向(mm)	188	\
周方向(°)	5	
機軸方向(mm)	100	<u>_</u>
備考	B737 economy +first class 座席22列	
		L
・ 固有振動解析を 20次までの振動	行う周波数範囲は hモードに対応する範囲とす	-&.

表 1.1.3-4 航空機実機想定モデル内部音響振動解析条件

表 1.1.3-5 デモンストレータ/航空機実機想定モデル 振動解析結果

		固有振動	b数(Hz)	tz)				
	デモンス	トレータ	航空機実機想定モデル					
	構造振動	内部音響	構造振動	内部音響				
次数	ST R001	AIR003	ST R1 02	AIR1 06				
1	① 129	Ø 50	① 21	Ø 9				
2	1 32	100	23	18				
з	151	③ 132	30	28				
4	152	132	33	37				
5	155	145	36	46				
6	156	145	39	3 49				
7	157	150	41	50				
8	158	171	47	53				
9	158	171	50	55				
10	162	196	52	56				

①:構造の最低次固有振動数

②:内部音響振動の最低次固有振動数

③:内部音響振動の半径方向モードの最低次固有振動数



 \times 1.1.31 Ű 構造最低次固有振動数に対するストリンガ断面形状寸度の影 嚩



③バルクヘッド形状/サイズ(/材料)

本供試体は航空機騒音の状態を模擬する必要があり、航空機実機のように胴体側方からの加振による機内騒音を供試体上に実現する必要がある。したがって、バルクヘット部分が加振源となって騒音が発生するのを極力押さえるため、バルクヘッドは極力高剛性化するのが望ましい(振動・騒音制御周波数範囲 0~500Hz(1.1.3(1)ii)項参照)に存在する固有振動モードを極力少なくする)。ただし、供試体のハンドリングの観点からバルクヘッド質量は小さい方が良い。

そこで、バルクヘッド形状やサイズ及び材料をパラメータとしてバルクヘッド単体の固有 振動数計算を実施した。計算結果をもとに各バルクヘッド仕様に対する質量と最低次固有 振動数についてプロットしたグラフを図 1.1.3-7 に示す。

これらの計算結果より、剛性が高く質量が比較的小さくてすむ以下の仕様をバルクヘッド形状/サイズ(/材料)として採用することとする。

・バルクヘッド形状 :円錐台形状 (スティフナあり)

- ・バルクヘッド材料 : Al 合金
- ・バルクヘッド各部形状/サイズ

*台円部:直径 ; 250mm

- スキン厚さ;10mm
- スティフナ;形状→コの字形状
 - ウェブ厚さ→10mm
 - ウェブ高さ→80mm
 - フランジ厚さ→10mm
 - フランジ幅→30mm

配置→半径方向 90° ずつ十文字に配置

*円錐部:頂角 ; 120°

- スキン厚さ;10mm
- スティフナ;形状→コの字形状
 - ウェブ厚さ→10mm
 - ウェブ高さ→80mm
 - フランジ厚さ→10mm
 - フランジ幅→30mm
 - 配置→半径方向 90° ずつ 4EA 及び周方向等間隔で 2EA

配置

なお、剛性を高くする上で最も有利な形状は球面形状であるが、製作コストを押さえる 意味から円錐台形状を採用する。

ジーで至・

。6者効要必るを置踊者せくすの不以りあたるも断指者れかし丑

せくታのかの予び奴器融加③ 融加31置かな伊適のセーマイスく子デおで魏結県旗を一元 計替健融のセーマイスく子デ 音の代内 补結 共び 双 み 至 / 健 融 の 凿 構 补 結 サ 、 3 代 以 T Z イ 、 5 ま 。 6 あ な 要 必 る で 置 弱 き 器

。るあで気そで直見てし朔気多果諸

・PZT配置/数量:供読体内側のスキン、フレーム上にセンサ、アウチュエーラ各180EA、

մ աաժ.0	ち見
աա0գ7	爭半率曲向쿥周
mm04	ち員向さ神勢
mm 06	ち灵向古周

(ひあーやくにいやくく) 状況研究員; 氷洗洗杯 : 裏や TZG・

ダーエエモダヤ1世ンサ (1

出変の機値融存固るも核び(量賀) 熱出当 ペハ セイババ アー 8.1.1 図



合 諸 (嗐 代 品 席 (て)

エットンシン

。るもてエキに層「含人でけ

回I アトモモーズトゼ(て)し生動処面表的ムーマにの樊金台 IA、彼方の山胡食謝瀬雷.A 021 # おご面触教のと金台 IA るわまご林台跡、方ま。を献きひ塗回 S パスモエキひ塗

野処面表(ウ)

Ⅲ通(100。KEDNCED HEVD) F 4 2°

- B.スキン外表面に頭が出るファスナは、一般の航空機で広く用いられている様式に合わせ、 B.スキン外表面に頭が出るファスナは、一般の航空機で広く用いられている様式に合わせ、
- A.福林部の組立に用いるパトを用いるが、141/5 3/161/ 径の CRES ポルトを用いる能の総か開A A.福林部の総合に用いるないにないたい。 本が、これらのいた、これらいいったいで、 たいにのないに設定する。 たいには、 たいに、 たいたいたいで、 たいに、 たいたいで、 たいたいで、 たいに、 たいたいで、 たいで、 たいたいで、 たいたいで、 たいたいで、 たいたいで、 たいたいで、 たいで、 たいたいで、 たいたいで、 たいたいで、 たいで、 たいで、 たいたいで、 たいで、 たいで

fXFT(F)

。そもと品席のてらびてし

。るあで味育き土略味優融、ひなびらごいな来ないとう。 も合誘モスママき間くキス~イーマモストモビス~快くリイス、約合誘の陪虐社マキス、 初知补一、ひあで林合動おイーマモストモビスらけくリイス、はな。そ行ひよびらごる

かのこき置か唐代。るをらて直氏くじすス、執同と舞空礁の強一、お置か唐代のくキス.D 唐代习内4(ネパの間ムー4て~氏くじすスるあでこーの衆技略時健融、おらこるを53置

- ふるす合語をなられば合語なたことの語である。 あのこを置か時代。るすらて直はくじすた、
 熱同く数空源の語ー、
 お罰か時代のくまたり
- こすと時代4向古間ンノ急考をしてし沢力の林合勇、沈るあで第回当 ではらい用>力で合誘の暗くキス当都本師の熟客苑の第一、おくキスゴノ汎力で店代4、B

嗜代のくキス(て) 関チで嗜代2向古間。るきで>ち小参イスに立路やは式し>な少多嗜代おくキス瘤本硼.A

(①1110体部)

。支示にしる

5、日本学校、1000日本語の当びた社会議会協構品語の語各ペーマイスンチデ、おでここの、1000日本語の当びた社会議会協構品語の語各ペーマイスンチデ、おでここの。

。るあで虫そるを宝造て

吉姆指張本基含量殘るれるえ巻く要公にとき含蘇実のでトハーせい、マーチの助び及果結 、以潤の情熱の画情線貼や指號則時時るで誠実更辛来、新同くTZG、やちし示以取I.8 の書 し她対き果諦の算指くEビーイエミビの瞬時音麗・腫沸び及情執瞬結のキー子腫患本病地

する。

C.台円部と円錐部の結合は、円錐部にフランジを設けてそこに台円部を合わせてファスナ 結合する。

(イ)ファスナ

- A.結合に用いるファスナは通常の Steel 製のボルトとする。
- (ウ) 表面処理
- A.Al 合金製であるバルクヘッド各部品の表面処理はアロジン処理とする。
- ③胴体部とバルクヘッドの結合
- (ア)胴体部とバルクヘッドの結合は、バルクヘッドにフランジを設け、その部分を胴体 側フレームに突き合わせてファスナ結合することにより行う。
- (イ)結合に用いるファスナは通常の Steel 製のボルトとする。
- (ウ) バルクヘッドは外側からのみのアクセスで胴体部へ取付けられるようにする。
- ④センサの取付
- (ア)供試体への PZT の装着は、「アクティブ・アダプティブ構造技術の研究 機内騒音低 減技術の開発」にて製作した小型構造要素供試体で実績のあるエポキシ接着剤 EA956 による接着とする。
- (イ) 振動加速度センサや歪ゲージについては接着剤により構造へ接着する。
- (ウ)供試体内部へのマイクロホンの配置は、バルクヘッド台円部中央に孔を設け、そこ に通した棒にマイクロホンを取付けることにより行う。
- ⑤その他全般
- (ア)供試体の胴体部及びバルクヘッドにはハンドリング用(懸吊用)のハードポイント を設ける。ただし、胴体部のハンドリング用(懸吊用)ハードポイントは、振動制 御への影響を避けるために胴体一般部には設けず、バルクヘッドと結合するフレー ム上に設ける。
- h)強度の確認

設定した仕様に対して、主に輸送/ハンドリング時の荷重に対する強度を確認し、強度余裕が確保されていることを確認した。詳細については基本設計報告書の付録 4.2.3 項に示す。

計画図面

設定した仕様から表 1.1.3-6 に示すデモンストレータの計画図を作成した。詳細は基本 設計報告書の付録 4.2.2.3 項に示す。

図面番号	題名
SD-01-3001	供試体組立-振動・騒音制御デモンストレータ試験
SD-01-3003	供試体組立形態- 振動・騒音制御デモンストレータ試験
SD-01-3004	供試体移動形態- 振動・騒音制御デモンストレータ試験
SD-01-3005	供試体水平懸吊形態-振動・騒音制御デモンストレータ試験
SD-01-3006	バルクヘッド懸吊形態-振動・騒音制御デモンストレータ試験

表 1.1.3-6 振動・騒音制御デモンストレータ 計画図面一覧

v)制御則設計

制御則設計では、デモンストレータの PZT センサ/アクチュエータの数量/配置や適用す る制御則及び制御システムの設定、制御シミュレーションによる振動・騒音制御の成立性 の検討を行う。本作業は来年度以降も実施する予定であるが、ここでは制御対象であるデ モンストレータの音響振動特性と PZT センサ/アクチュエータの数量/配置の仮設定につい て述べる。

a)デモンストレータ音響振動特性

3.2.4 項で設定した仕様を持つ振動・騒音制御デモンストレータの振動特性について、 NASTRAN による音響振動解析結果を以下のように示す。

- ・固有振動数 :表 1.1.3-7
- ・振動モード : 図 1.1.3-8
- ・モード密度 :図 1.1.3-9

次粉		次数		次数:		次数	,	次数									
1	50.2	51	170.5	101	201.8	151	220.7	201	2474	251	277.0	301	344.3	351	4193	401	4861
2	50.3	52	170.5	102	201.8	152	220.7	202	247.4	252	2770	302	344.3	352	419.3	402	4861
2	100.0	53	1710	103	202.6	153	220.9	203	247.8	253	277.4	303	344.3	353	4193	403	486.6
1	100.4	54	1710	104	202.6	154	220.9	204	247.8	254	277.4	304	344.3	354	419.3	404	486.6
5	106.0	55	171.0	105	202.0	155	223.6	205	2479	255	2780	305	344.9	355	419.3	405	486.7
6	106.0	56	171.0	106	202.8	156	223.6	206	247.9	256	278.0	306	344.9	356	419.3	406	486.7
7	114.2	57	172.2	107	202.0	157	224.9	207	247.9	257	278.7	307	345.0	357	424.4	407	4917
8	114.2	58	1722	108	203.8	158	224.9	208	247.9	258	278.7	308	345.0	358	424.4	408	4917
0	118.2	50	174.4	109	204.3	159	225.3	209	248.6	259	2790	309	366.9	359	4271	409	4917
10	118.2	60	174.4	110	204.3	160	225.3	210	248.6	260	279.0	310	366.9	360	427.1	410	4917
11	122.2	61	176.9	111	205.2	161	227.2	211	2491	261	279.4	311	366.9	361	440.7		
12	122.2	62	176.9	112	205.2	162	227.2	212	2491	262	279.4	312	366.9	362	440.7		
13	130.8	63	177.0	113	205.9	163	227.9	213	2498	263	279.9	313	371.0	363	440.7		
14	130.8	64	1770	114	205.9	164	227.9	214	249.8	264	279.9	314	371.0	364	440.7		
15	131.0	65	181.1	115	206.7	165	229.2	215	250.6	265	282.9	315	378.4	365	441.2		
16	131.0	66	181.1	116	206.7	166	229.2	216	250.6	266	282.9	316	378.4	366	441.2		
17	144.8	67	181.5	117	206.8	167	230.6	217	251.1	267	282.9	315	378.8	367	441.2	;	
18	144.8	68	181.5	118	206.8	168	230.6	218	251.1	268	282.9	318	378.8	368	441.2	;	
19	149.4	69	182.5	119	207.3	169	231.3	219	251.1	269	284.7	319	381.3	369	447.7		
20	149.4	70	182.5	120	207.3	170	231.3	220	251.1	270	284.7	320	381.3	370	447.7		
21	151.0	71	183.7	121	207.5	171	231.6	221	251.7	271	291.5	321	385.3	371	450.4		
22	151.0	72	183.7	122	207.5	172	231.6	222	251.7	272	291.5	322	385.3	372	450.4		
23	152.1	73	184.9	123	208.0	173	232.0	223	252.1	273	291.6	323	385.4	373	450.6		
24	152.1	74	184.9	124	208.0	174	232.0	224	252.1	274	291.6	324	385.4	374	450.6		
25	155.2	75	186.6	125	209.9	175	233.3	225	252.5	275	302.2	325	389.3	375	463.0		
26	155.2	76	186.6	126	209.9	176	233.3	226	252.5	276	302.2	326	389.3	376	463.0		
27	155.4	77	187.7	127	210.9	177	234.8	227	255.0	277	306.0	327	389.8	377	463.0		
28	155.4	78	187.7	128	210.9	178	234.8	228	255.0	278	306.0	328	389.8	378	463.0		
29	157.1	79	188.1	129	211.2	179	235.6	229	257.3	279	306.1	329	394.4	379	469.1		
30	157.1	80	188.1	130	211.2	180	235.6	230	257.3	280	306.1	330	394.4	380	469.1	1	
31	157.3	81	189.5	131	212.6	181	238.8	231	258.6	281	307.7	331	394.4	381	469.6		
32	157.3	82	189.5	132	212.6	182	238.8	232	258.6	282	307.7	332	394.4	382	469.6	1	
33	160.7	83	190.2	133	212.7	183	238.8	233	259.2	283	307.7	333	395.2	383	473.2		
34	160.7	84	190.2	134	212.7	184	238.8	234	259.2	284	307.7	334	395.2	384	473.2		
35	161.2	85	191.9	135	212.9	185	239.1	235	259.2	285	308.6	335	395. 9	385	4732		
36	161.2	86	191.9	136	212.9	186	239.1	236	259.2	286	308.6	336	395. 9	386	473.2		
37	163.6	87	192.2	137	213.5	187	239.2	237	260.9	287	316.9	337	401.2	387	477.6		
38	163.6	88	192.2	138	213.5	188	239.2	238	260.9	288	316.9	338	401.2	388	477.6		
39	165.5	89	193.6	139	213.8	189	239.5	239	261.9	289	315.3	339	401.3	389	477.6		
40	165.5	90	193.6	140	213.8	190	239.5	240	261.9	290	315.3	340	401.3	390	477.6		
41	166.1	91	193.6	141	214.0	191	241.3	241	269.4	291	322.6	341	404.0	391	479.9	1	
42	166.1	92	193.6	142	214.0	192	241.3	242	269.4	292	322.6	342	404.0	392	479.9		
43	166.5	93	196.1	143	215.8	193	241.5	243	270.8	293	322.8	343	414.2	393	480.3		
44	166.5	94	196.1	144	215.8	194	241.5	244	270.8	294	322.8	344	414.2	394	480.3		
45	167.8	95	200.8	145	218.4	195	243.5	245	272.3	295	334.1	345	414.2	395	480.5		
46	167.8	96	200.8	146	218.4	196	243.5	246	272.3	296	334.1	346	414.2	396	480.5		
47	169.8	97	201.1	147	218.4	197	243.7	247	272.4	297	336.2	347	414.9	397	480.6		
48	169.8	98	201.1	148	218.4	198	243.7	248	272.4	298	336.2	348	414.9	398	480.6		
49	169.9	99	201.1	149	219.6	199	247.2	249	273.1	299	343.2	349	419.1	399	486.0		
50	169.9	100	201.1	150	219.6	200	247.2	250	273.1	300	343.2	350	419.1	400	486.0		

表1.1.3-7(1/2) デモンストレータ固有振動数(Hz)(構造-内部音響連成)

					構	 造								空	気		
次数		次数		次数		次数		次数		次数		次数	-	次数		次数	
1	109.6	51	208.5	101	270.8	151	360.0	201	434.9	251	536.3	1	0.0	51	371.0	101	480.3
2	117.1	52	209.9	102	273.2	152	360.0	202	441.7	252	539.6	2	50.3	52	378.4	102	480.3
3	123.8	53	211.0	103	275.3	153	364.4	203	442.4	253	540.8	3	100.4	53	378.8	103	480.3
4	127.5	54	212.9	104	277.5	154	370.0	204	442.7	254	541.2	4	132.4	54	380.6	104	480.4
5	151.0	55	212.9	105	278.7	155	370.3	205	442.8	255	541.2	5	132.4	55	380.6	105	480.4
6	152.1	56	214.0	106	280.3	156	372.2	206	449.2	256	545.8	6	144.9	<u>5</u> 6	382.5	106	484.4
7	155.2	57	215.8	107	281.2	157	373.0	207	451.4	257	546.7	7	144.9	57	382.5	107	484.4
8	155.4	58	215.8	108	282.8	158	373.3	208	452.4	258	547.1	8	149.4	58	385.3	108	485.2
9	157.1	59	216.2	109	282.9	159	374.3	209	453.1	259	547.1	9	171.0	59	385.3	109	491.7
10	157.3	60	218.1	110	284.7	160	375.7	210	453.5	260	549.4	10	171.0	60	388.4	110	491.7
11	161.2	61	218.4	111	288.5	161	376.0	211	462.6	261	549.7	11	196.1	61	388.4	111	495.3
12	163.0	62	218.8	112	288.6	162	376.0	212	462.8	262	551.4	12	206.8	62	390.5	112	495.3
13	164.0	63	220.0	113	290.7	163	382.6	213	463.1	263	553.7	13	206.8	63	390.5	113	497.5
14	165.7	64	221.0	114	292.6	164	384.7	214	463.5	264	554.3	14	218.3	64	394.3	114	497.5
15	166.4	65	221.5	115	292.8	165	384.7	215	464.5	265	554.5	15	218.3	65	394.3	115	498.7
16	166.5	66	226.7	116	294.0	166	384.7	216	465.5	266	555.2	16	227.1	66	400.0	116	498.7
17	167.8	67	229.3	117	296.1	167	384.9	217	467.8	267	555.8	17	227.1	67	400.0	117	501.7
18	170.0	68	230.2	118	298.4	168	385.0	218	467.9	268	555.9	18	235.6	68	403.9	118	502.2
19	170.5	69	231.3	119	299.4	169	386.5	219	469.0	269	558.1	19	245.4	69	403.9	119	502.2
20	172.2	70	231.5	120	300.0	170	387.4	220	471.8	270	558.1	20	245.4	70	4142	120	513.1
21	173.2	71	231.8	121	303.9	171	387.9	221	472.1	271	558.9	21	247.9	71	4142	121	515.5
22	174.4	72	232.3	122	305.0	172	390.4	222	474.0	272	559.3	22	247.9	72	414.9	122	515.5
23	176.9	73	233.2	123	310.1	173	391.3	223	474.3	273	559.6	23	260.9	73	417.7	123	516.9
24	177.1	74	235.3	124	314.3	174	394.5	224	477.0	274		24	272.4	74	417.7	124	517.0
25	181.1	75	238.8	125	319.5	175	394.6	225	478.8	275		25	272.4	75	419.3	125	517.0
26	181.6	76	239.0	126	320.0	176	396.5	226	480.0	276		26	279.0	76	419.3	126	520.3
27	182.5	77	239.0	127	322.4	177	396.6	227	482.6	277		27	279.4		424.4	127	520.3
28	183.7	78	239.9	128	322.5	178	399.8	228	484.3	278		28	291.4	78	427.0	128	520.8
29	185.1	79	241.3	129	330.3	179	403.6	229	484.5	2/9		29	291.4	/9	427.0	129	520.8
30	186.7	80	241.5	130	331.0	180	407.3	230	485.3	280		30	300.6	80	440.7	130	525.9
31	187.7	81	242.2	131	334.9	181	407.4	231	487.0	281		31	300.6	81	440.7	131	526.4
32	188.2	82	243.2	132	334.9	182	408.5	232	487.7	282		32	302.2	82	441.1	132	521.0
33	189.7	83	246.0	133	338.9	183	411.3	233	489.9	283		33	306.0	83	441.)	124	531.0
34	190.2	84	24/2	134	342.1	184	415.5	234	491.3	284		34	300.0	04	441.1	1.04	531.0
35	192.0	85	247.8	135	343.2	185	417.1	235	497.0	285		30	307.0	00	447.7	126	522.7
36	192.2	86	248.2	136	343.3	180	418.7	230	497.8	280		30	307.0	00	450.4	130	520.7
3/	193.6	8/	248.0	137	347.5	187	419.0	237	500.1	20/		<u>3/</u> 20	321.9	207 202	450.0	137	 528.2
38	193.6	88	249.4	138	347.5	188	420.5	230	500.4	200		20	321.0	90	462.0	130	540.3
39	200.9	89	250.0	140	348.2	189	420.0	239	500.0	209		40	32/1	<u> </u>	462.0	140	540.3
40	201.1	90	200.1	140	348.7	190	420.7	240	507.4	290		40	334.1		465.4	141	549.8
41	201.3	91	201.7	141	249.4	102	420.9	241	509.9	202		47	3362	92	465.4	142	549.8
42	202.2	92	201.9	142	2527	192	420.0	242	5217	202	·	43	3432	92	469.1	143	5501
43	202.8	93	202.0	143	200.7	193	4212	240	521.7	200		 	3432	00 04	469.6	144	5501
44	203.9		204.0	144	300.1	105	421.5	244	5240	204	i	45	3432	95	469.6	145	554.6
40	204.3	90	201.0	140	3565	195	420.5	245	529.7	200	 !	46	344.2	96	4704	146	554.6
40	204.8	90	200.0	140	3570	190	420.9	240	520.7	200		47	344.2	97	470.4	147	5571
4/	2002	97	200.0	147	350.2	100	4205	247	522.7	207	(48	366.9	98	479.9	148	557 1
40	200.0	00	261.6	140	350.5	100	4314	249	534.6	200	1 1	49	366.9	99	479.9	149	557.5
49 50	207.3	100	269.6	150	350.6	200	433.4	250	5351	300	(1)	50	371.0	100	480.3	150	557.5
	201.0	100		100							l	I		L	L	151	558.4

表 1.1.3-7 (2/2) デモンストレータ固有振動数 (Hz) (構造のみ及び内部音響 [空気] のみ)

 152
 558.4

 153
 558.5

PZT センサはアクチュエータと並べて同数配置することとする。よって、センサとアク
 チュエータの合計数量は(144+36)×2=360EAとなる。
 ②PZT 寸度

PZT の寸度については、現在実施している「アクティブ・アダプティブ構造技術の開発 機内騒音軽減技術の研究」における結果(この試験で用いた PZT[富士セラミックス C-91] の寸度は 20×40×0.3 t mm であり、デモンストレータではもっと大きな駆動力の出せる 大きな寸度のものが必要)、及び、使用を想定しているアクチュエータ材料・素子グルー プの開発品の製造性から以下の値とする。

- ・外形形状;長方形形状(シングルコンターあり)
- ・周方向長さ;30mm
- ・機軸方向長さ;40mm
- ・周方向曲率半径;750mm
- ・厚さ;0.5mm t

なお、今後の検討により、PZTの形状寸度を変更する必要が生じた場合は、上記開発品ではその製造性(寸度制約、製造期間)から対応不可能であり、変更した形状の既製品 PZT (富士セラミックス C-91H)と上記開発品を混用することで対応するものとする。 1.1.4 デモンストレータ試験総合技術評価

(1)ウェーブレット変換を用いた高精度AE位置標定手法の開発

(i)緒言

構造体の表面に突発的な衝撃力が加わったり、構造体内部に損傷が発生したりした際に 発生する弾性波(AE)を PZT センサなどで捉えることによって、動的にそれらの検知を行 うことができ、さらに複数のセンサで AE の到達時間差を測定することで位置標定を行う ことが可能となる.通常薄板状で用いられる CFRP 構造体を対象とした際に、弾性波は群 速度に異方性を有するラム波として伝播する.ラム波は S₀モードと A₀モードで構成され、 特に表面への衝撃など面外変位に際しては S₀モードの振幅は小さく、A₀モードで構成され、 特に表面への衝撃など面外変位に際しては S₀モードの振幅は小さく、A₀モードの振幅は 大きくなる.ここで、S₀モードを用いて位置標定を行う際に問題となるのが立ち上がり時 間の決定であり、振幅が小さい S₀モードとノイズとの識別が困難であり、さらに S₀モー ドの群速度が非常に速いため、高精度の位置標定には困難があった.そこで、本研究では ウェーブレット変換を用いることによって、A₀モードの到達時間を容易にかつ正確に求め、 高精度位置標定手法の確立を行った.

(ii) 実験方法

供試材の CFRP パネルは Hexel 製の CFRP プリプレグを八枚積層し, 180℃, 0.3MPa の温度, 圧力条件で2時間ホットプレス成形して作製した. 作製した CFRP パネルのサイズは 200×150×2mm であり, 積層構成は[0]₈の一方向材および[0/90]₂₈の直交材である.

こうして作製した二種類の CFRP パネルについてラム波の群速度測定を行った.測定に 用いた二つの AE センサは共振型 PZT センサ(富士セラミックス, M204A, 直径 4mm)で あり, センサ間距離は 100mm とした. 擬似 AE 源の発生には、シャープペンシルの芯圧 折を試験片表面に対して垂直に行った. 両センサで検出した AE 波形はアンプ (A1002,富 士セラミックス)で増幅し、デジタルオシロスコープ (Lecloy,LC334A:垂直分解能 8 ビッ ト)を用いてサンプリング間隔 100ns, 5000 ポイントの条件で収録した. その後、特定周 波数についてのウェーブレット変換を行い、ウェーブレット係数のピーク時間をもって到 達時間とした. ここで、100kHz 以下の低周波数を用いた場合、ピークが幅広く、群速度 のばらつきが大きかった. それに対して 300kHz 程度の高周波数を用いた場合、ピークが 鋭く,群速度のばらつきが小さかった.そこで本研究ではAoモードの周波数として 300kHz を選択した.

図 1.1.4-1に一方向材における 45°方向の Ao モード音速測定に用いた各センサでの検 出波形およびそれらの波形をウェーブレット変換して得られた 300kHz のウェーブレット 係数を示す.検出波形において Ao モードの到達に伴い現れる大振幅に対応してウェーブ レット係数のピークが鋭く明確に現れているのが分かる.ウェーブレット変換を用いるこ とによって,Ao モードの到達時間が精度よく、容易に求めることが可能であることが分か る.こうして決定された到達時間を各センサについて求め、センサ間距離を到達時間差で 除した値を群速度とし、さらに方向性による群速度分布を求めた.得られた群速度分布を 図 1.1.4-2 に示す.一方向材に関しては So モード,Ao モードともに群速度の異方性が現 れた.これに対して、直交材に関しては So モードの群速度の異方性は現れたものの、Ao モードの群速度はほぼ一定値を示した.さらに得られた群速度分布をもとに近似式を求め、

函 び Ao モード到達時刻をそれぞれ(xi,yi)および ti, 令 **ド** へ 次に位置標定手法を示す. 4 n-求める AE 源の座標を P(x,y), i 番目の AE セ θi 方向の群速度を Vi(θi), ンサの位置お AE センサの半 ᢞ᠇

$$f_{ij}(x,y) = \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - r}{V_i(\theta_i)} - \frac{\sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} - r}{V_j(\theta_j)} - (t_i - t_j)$$

$$= 0 \quad (i, j = 1, 2, 3)$$
(1)

\$ る関係が成立しなければならない.

程式が必要である、そ 最小二乗法を用いて, 式(1)の連立方程式から AE 源の座標(x,y)を求めるためには, (1 \mathcal{T} , (i,j) = (1,2), (1,3)の二組のセンサ間到達時間 少なく ſ~ Ċ۴. 差から, つの独立な方 非徽形

 $\sum f_{ij}^{2}(x,y) < 10^{-10}$

を収束条件として AE 源(x,y)を求め 75

છ

(ⅲ) 結果と老寮

挙げられるが,それらの誤差要因にも関わらず,非常に高精度な位置標定結果が得られた. 行い、位置標定を行った.図 1.1.4-3 に一方向材と直交材における位置標定結果およびセ Aoモードの群速度の異方性がほとんどなく、等方体として取り扱う った、誤差の要因としてはセンサの貼り付け位置、芯圧折位置、用いた音速の近似式等が ンサ位置を示す. しかも高精度な位置標定が可能になるこ これよりウェ 開発した位置標定手法の検証を行うために、シャ を用いる利点は大きいこ ーブレット変換を利用するい 平均誤差は一方向材, 直交材においてそれぞれ 1.44mm, 1.35mm であ とを明らかにした こを示すこ とで、容易に Aoモ とができた. **プペンシアの芯圧折を試験片表面で** ドの到達時間を決定でき、 12 ស ក ٢١ とができ 直交材に関しては さた £, A

ι 1

て;





図 1.1.4-3 一方向材および直交材における位置標定結果とセンサ位置

(2) TiNi/CFRP 複合材料の界面特性

i) 緒言

知的材料は、センサとアクチュエータ機能を兼ね備えた形状記憶合金、圧電材料や センサ機能を有する光ファイバを CFRP 等の構造材料と一体化して、創製することがで きる.本研究では CFRP に埋め込むアクチュエータ材として TiNi 形状記憶合金 (SMA) ワイヤーを用い、TiNi 埋め込み CFRP スマート複合材料を製造した.優れたアクチュエ ータ特性を有する TiNi/CFRP 複合材料を創製するためにはマニュファクチャリング技 術と TiNi/CFRP 複合材料の界面特性が重要である.そして、本研究では、ホットプレ スにより作製された TiNi/CFRP 複合材料における界面の微細組織の観察と界面結合力 の測定を行い、TiNi ワイヤーの表面処理の効果を評価した.

ii) 実験方法

CFRP 積層板の成形には直径 0.4mm の TiNi ワイヤー(大同特殊鋼)と厚さ 0.2mm の CFRP プリプレグ (Hexcel Co.)を用い、CFRP プリプレグと TiNi ワイヤーを一方向に積 層する際に4層を積層した CFRP プリプレグ上に, 治具を使用し, TiNi ワイヤを1mm 間隔に配列した. さらに、その上に4層を積層した CFRP プリプレグをのせ、CFRP プリ プレグ8枚が積層された中心部に強化材としてTiNiワイヤーを1mm間隔に埋め込まれ るように成形した。CFRP プリプレグの積層方向が複合材料の引張り強度に及ぼす影響 を評価するため, CFRP プリプレグをそれぞれ, 0°, 30°, 60°, 90°方向で積層した. その後, CFRP 専用のホットプレスで 180℃, 310kPa の条件で TiNi ワイヤー/ CFRP 成形 体を加熱・加圧することにより複合材料を製造した。その後、TiNi/CFRP 複合材料を引 張試験用の試験片として JIS-K 7073 に従って各々加工し、引張り強度を評価した. ま た、微細組織を調べるため、研磨された試験片と破断された試験片を SEM によって、 TiNi ワイヤーと気孔の分布,界面,破断面の観察を行った.また, CFRP と TiNi ワイ ヤーとの界面結合に及ぼす影響を評価するため、それぞれ、HC1、H₂SO₄、HF+HNO₃によ って3分間 TiNi ワイヤーを表面処理し、表面処理された一本の TiNi ワイヤーを CFRP プリプレグに埋め込んだ複合材料を製造し、プルアウト試験により TiNi ワイヤーと CFRP 母材との界面結合力を評価した.

3) 結果と考察

TiNi ワイヤー/CFRP 複合材料の引張り強度は CFRP の積層方向に大きく依存するの で、TiNi の相変態を利用した TiNi ワイヤー/CFRP 複合材料の機能的な特性を発現す る材料設計を行うため、CFRP 積層方向による TiNi ワイヤー/CFRP 複合材料の引張り 強度と欠陥の分析の評価が重要である。 0°積層 TiNi ワイヤー/CFRP 複合材料の引張 り強度は 1. 2GPa であったが、CFRP の積層角度が大きくなるほど引張り強度は低下し、 90°方向積層 TiNi ワイヤー/CFRP 複合材料の場合、引張り強度は 50MPa であった. 従 って、TiNi ワイヤー/CFRP 複合材料に引張り負荷を与えた場合、外部荷重負担は炭素 繊維の配列方向によって左右されているのが分かった. また、0°積層 TiNi / CFRP 複合 材料を SEM によって観察した結果、TiNi ワイヤー周辺では大きな気孔が存在し、大き さは平均 30 μ m であった. 埋め込まれた TiNi ワイヤーのら離れるほど、気孔量は少な くなった. 全体的な気孔率は約 2%であった. 180℃、 0.3 MPa の条件で作られた TiNi ワイヤー/CFRP 複合材料における TiNi ワイヤーと CFRP マトリックスの界面部を SEM によって観察した結果、図 1.1.4-5 に示したように界面には約 1.2 μ m 幅のき裂の発 生が観察された. このようなき裂発生はホットプレスで成形体を加熱した後、冷却段 階で TiNi ワイヤーと CFRP マトリックスのエポキシ樹脂との熱膨張係数の差に起因す るものである、このような界面き裂は特に複合材料の強度低下、さらにマルテンサイ ト相からオーステナイト相へのTiNi相変態の際に発生する圧縮応力低下の原因となる. このため、知的材料としての信頼性と耐久性が低下する可能性がある. このような界 面き裂は TiNi ワイヤーを埋め込む前段階の TiNi ワイヤーの表面処理よって改善され ることが期待される。例えば、酸処理、コーティング、サンドブラスティングなどが 挙げられる. その中で、本研究では酸処理によって TiNi ワイヤーの表面処理を試み、 HC1, H₂SO₄、HF+HNO₃を利用し表面処理を行った.その後, CFRP プリプレグに埋め込ん で最適製造条件を用い、一本の TiNi ワイヤー埋め込み CFRP 複合材料を製造し、SEM によって複合材料の切断面での TiNi ワイヤーと CFRP の界面状態を観察することと共 にプルアウト実験によって界面結合力を測定した. SEM 観察の結果, TiNi ワイヤーの 表面処理を施していない CFRP 複合材料に比べ, HC1, H₂SO₄ HF+HNO₃によって表面処理 を行った CFRP 複合材料の場合, TiNi ワイヤーと CFRP の界面にき裂や欠陥が存在せず, TiNi ワイヤーと CFRP の界面状態が改善された. そして, TiNi ワイヤー埋め込み CFRP 複合材料をプルアウト試験によって界面結合力を測定し、その結果を図 1.1.4-5 に示 した.未表面処理の試験片に比べ、酸表面処理を行った試験片の場合、界面結合力が 増加し、特に、HF+HNO。による表面処理された場合、界面結合力が15%増加した.これ は、図 1.1.4-6、図 1.1.4-7 に示した SEM 結果から、酸表面処理によって TiNi ワイ ヤーの表面粗さが増加し、CFRP 母材との結合面積を増加させることと共に強固な結合 をもたらした結果に起因するものと考えられる.



図 1.1.4-4 界面で発生したき裂の SEM



図 1.1.4-5 界面強度



図 1.1.4-6 未表面処理の TiNi の表面



図 1.1.4-7 HF+HNO3 処理の TiNi の表面

1.2 達成状況

- 1.2.1 「損傷検知・損傷抑制」デモンストレータ試験 平成12年度は基本設計フェーズとして、
 - ・試験供試体の仕様
 - ・強度および剛性
 - ・供試体の計画図面
 - ・試験装置
 - ・試験方法
 - ・目標に対する評価検証方法
 - 部分構造試験
- の明確化および設定・作成を目標とした。
 - これに対し、
- (1) 胴体外径、胴体長、隔壁パネル、等の主要諸元および構造様式、負荷時の予想発生 歪量、重量、等を設定した。さらに、供試体の部品構成、分割方法、各部品間のイン ターフェース、上面・下面・側面・隔壁の各パネルへの設計要求、等を設定した。さ らに、各パネルの構造様式、相互の結合方式、スキン板厚、センサー/アクチュエー タの配置および取り付け方法を明確にした。
- (2) 所要負荷に対する強度および剛性を定量的に算定し、安全に試験できることを確認した。
- (3) 計画図面を作成した。
- (4) 架構の構造および諸元、負荷装置および計測装置の仕様、試験場レイアウトを設定した。
- (5) デモンストレーション・テーマ毎の負荷様式、負荷様式に対する荷重値、試験シーケンス、計測方法および検査方法を設定した。
- (6) 6 つのデモンストレーション・テーマ毎に、試験目的、評価部位、評価項目、試験項目、取得データ、等を明確にした。
- (7)上面、側面、下面の各パネルに相当する平面パネルについて、部分構造試験供試体 を製作・試験し、センサおよびアクチュエータの埋め込みおよび取出し法、等の技 術を取得した。

以上により、基本設計の目標を達成した。

1.2.2「騒音・振動低減」デモンストレータ試験

平成12年度は基本設計フェーズとして、

- ・試験供試体の仕様
- ・目標に対する評価検証方法
- ・供試体の計画図面
- ・試験装置
- ・試験方法

の明確化および設定・作成を目標とした。

これに対し、

- (1)制御対象周波数領域、達成目標の検証方法、所要試験(振動特性データ取得試験、振動制御試験、騒音制御試験)の仕様および試験実施場所、等を明確にした。さらに、 想定するセンサおよびアクチュエータの諸元ならびに使用数量、配置等に関する第 1次見積もりを実施した。
- (2) 供試体の構造様式, 部品構成および適用材料、NASTRAN による構造-音響連成振動解 析に基づくフレームおよびストリンガ等主要部品の配置および形状・諸元、隔壁部 の形状・諸元等を設定し、計画図面を作成した。
- (3)供試体の支持方法、振動・音響の励起方法、計測装置の仕様、所要試験冶具等を明らかにした。
- (4) 励起周波数領域、所要計測データおよび計測方法、データ処理手順、等を明確にした。 以上により、基本設計の目標を達成した。

1.3 結論

「損傷検知・損傷抑制」および「騒音・振動低減」の2つの試験からなるデモンスト レータ試験は、平成12年度において基本設計を完了した。各々の供試体に対して、仕 様、計画図面、試験装置、試験方法等を明確化ならびに作成を行った。アウトプットの 詳細は基本設計報告書としてまとめ、本報告書の記載内容を補完する。

来年度は、詳細設計フェーズとして、2種類の供試体の製造図面を作成するととも に、複合材パネルを主体とする部品製作に着手する。さらに、試験装置に関しても製造 図面を作成し、部品製作に着手する。「騒音・振動低減試験」試験では、供試体を組立 て振動特性データ取得試験を開始する。

2. 研究発表・講演、文献、特許等の状況

- 2.1研究発表·講演
- (1) 宮崎、"「知的材料・構造システムの研究開発」 ~ デモンストレータ試験~"、平成 12 年度「超音速輸送機開発調査 第2会小委員会、(社)日本航空宇宙工業会、2000 年11月15日、東京
- (2) 宮崎 崇夫、小林 孝行、長井 謙宏、木元順一、"デモンストレータ試験"、第 2 回 「知的材料・構造システム」シンポジウム、(財)次世代金属・複合材料研究開発協 会、2000 年 12 月 6 日、東京
- (3) 宮崎、"「知的材料・構造システム」の研究開発状況"、平成 12 年度第 4 回 SAMPE-Japan 技術情報交換会、先端材料技術協会、2001 年 1 月 17 日、東京
- (4) T. Miyazaki, "The Concept Demonstrator Program of the "Smart Materials and Structures System" Project in Japan", US-JAPAN SYMPOSIUM ON SMART MATERIALS, METI and OFFICE OF NAVAL RESEARCH, USA, March, 2001, Newport Beach, CA, USA
- (5)Byung-Koog Jang, Nobuyuki Toyama, Ja-Ho, Koo and Teruo Kishi "Mechanical Properties and Manufacturing of TiNi/CFRP Smart Composites" 10th iketani conference on materials research toward the 21st century, June

26-30,2000,Karuizawa,Japan

- (6)Byung-Koog Jang, Ja-Ho Koo, Nobuyuki Toyama, Yoshio Akimune and Teruo Kishi "Influence of lamination direction on fracture behavior and mechanical properties of TiNi SMA wire embedded CFRP smart composites"SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, 4-8 March 2001, Newport Beach, California USA
- (7)張 炳國、Ja-Ho Koo、遠山暢之、秋宗淑雄,岸 輝雄"TiNi/CFRP 複合材料の力学 的特性に及ぼす CFRP 積層方向の影響"2001 年金属学会春期大会,2001 年 3 月 28 日~30 日,千葉工業大学芝園キャンパス
- (8)Ja-Ho, Koo, Byung-Koog Jang, Nobuyuki Toyama and Teruo Kishi, "Embedding Effect of SMA Wire / Optical Fiber on Damage Zone of CFRP by Acoustic Emission Signal Analysis" 10th iketani conference on materials research toward the 21st century, June 26-30,2000,Karuizawa,Japan Ja-Ho, Koo, Nobuyuki Toyama, Byung-Koog Jang and Teruo Kishi "Acoustic Emission Signal Analysis on SMA Wire / Optical Fiber Embedding CFRP"15th International Acoustic Emission Symposium, September 11-14,2000, Tokyo, Japan

2.2 文献

- (1)Byung-Koog Jang, Nobuyuki Toyama, Ja-Ho, Koo and Teruo Kishi, "Mechanical Properties and Manufacturing of TiNi/CFRP Smart Composites" Journal of Materials and Product Technology, vol.16(1-3) 117-124 (2001)
- (2)Byung-Koog Jang, Nobuyuki Toyama, Ja-Ho, Koo and Teruo Kishi, "Mechanical Properties and Manufacturing of TiNi/CFRP Smart Composites" proceedings of the 10th iketani conference on materials research toward the 21st century, Karuizawa, Japan, June 26-30, pp 417-418 (2000)
- (3)Ja-Ho, Koo, Byung-Koog Jang, Nobuyuki Toyama and Teruo Kishi, "EmbeddingEffect of SMA Wire / Optical Fiber on Damage Zone of CFRP by Acoustic Emission Signal Analysis" proceedings of the 10th iketani conference on materials research toward the 21st century, Karuizawa, Japan, June 26-30, pp 429-430 (2000)
- (4)Ja-Ho, Koo, Nobuyuki Toyama, Byung-Koog Jang and Teruo Kishi, "Acoustic Emission Signal Analysis on SMA Wire / Optical Fiber Embedding CFRP" Progress in Acoustic Emission X (proceedings of the 15th International Acoustic Emission Symposium, Tokyo, Japan, September 11-14, pp 305-312 (2000)
- 2.3 特許等

なし

 4 その他の公表(プレス発表等) なし

第Ⅵ章

総合調査研究

299 300 301
300 301
301
001
301
301
301
302
302
304

<u>VI. 総合調査研究</u>

要 約

総合調査研究は、プロジェクトの4大学集中研の研究開発におけるそれぞれの独自性 を尊重しつつ活性化をはかりながら、諸成果を全体として統合した方向に収斂させるこ とを狙いとする。

まず、技術委員会において、プロジェクト全体の推進に関する共通認識の確認と意志 決定、年次研究計画の策定および研究成果の検討等を行った。定常的な統合調整のため に、3国立研究所を含む全研究機関から月次報告書を提出して頂き、これを編集し全研 究機関および通商産業省(現経済産業省)、工業技術院、NEDOの関係先に配布した。

前述に加え、集中研技術検討会を定期的に開催し、研究者各自が研究の進捗を把握し、 プロジェクト全体の進展状況等の理解を深めるようにした。

さらに、平成 12 年 12 月 5 日、6 日に、東京 (財)機械産業記念事業団、TEPIA ホ ールにおいて第 2 回「知的材料・構造システム」シンポジウムを開催し、成果発表と討 論および関係者の交流を行った。プロジェクト研究発表 33 件、5 パネル討議に加え、 スタンフォード大学 Fu-Kou Chan 教授の特別講演があり、最後にプロジェクトリーダ 岸 輝雄教授による総括講演があった。参加者は 200 名を超え、2 日目最終の総括講演 まで、会場には多数の出席を得て、終始熱のこもった発表、討論が行われた。

また、プロジェクトにおける自らの研究を内外の研究との関係で比較検討するととも に、新技術情報の把握のため技術調査を行うとともに、集中研での研究を補完するテー マについては特定の大学に昨年度に引き続き再委託した。なお、3月に開催された当該 技術分野の世界最大の国際会議である SPIE シンポジウムにプロジェクトの研究開発 成果を展示し、意見交換、情報収集を行った。展示ブースには 200 名を超える来訪者 があり、成功裡に終えた。

– Summary –

The comprehensive investigation and research aims to integrate and manage research and development of the project toward the originally designated object as a whole, in respecting and activating the respective four-university research centers.

In principle, more importance has been put was than last two years to the promotion of common understanding of final target of the project by making cooperation tighter and denser among the consortium of the project, with holding the technical steering committee to check and review the respective research and development of the project in relation to the scientific and technological information of the other research inside and outside the country. The monthly reports of all research groups were edited and distributed to all members related to the project to understand the status of the current activities of the project. In addition to the above, the research center technical meetings were held periodically in order to grasp the progress of the research and to understand the general direction of the advancement of project by the respective researchers.

It has to be mentioned here, too, that "Smart Materials Symposium 2000"(2nd symposium of the Project) was held on 5th and 6th of December at TEPIA Hall, TEPIA Foundation, Tokyo to make presentation and discussion by researchers and to give an opportunity for them to communicate each other and also with all the related people. There have been totally 33 presentations, 5 panel discussions in addition to the keynote speech by Professor Fu-Kou Chan, Stanford University and the final review of the current project by the project leader, Professor Teruo Kishi. Over 200 people in all has participated and enthusiastic presentations and discussions been carried out all the time.

In addition, investigation on the information of research and development of the related fields inside and outside the country has been promoted and complementary researches on the special themes have been entrusted to other university laboratories.

Further, RIMCOF participated in the SPIE symposium, the largest international symposium of Smart Structures and Materials in the world, held in March 2001. Information and comments were discussed with participants at Exhibit Booth where research activity and outcome of the project were displayed. The exhibition was successfully closed after more than 200 people visited the Booth.

1. 目的

総合調査調査研究は、次の項目について実施し、プロジェクトリーダーの指示の下に プロジェクト全体の研究開発の方向付け、進捗管理、各サブリーダー担当の要素技術研 究間の連携・協力の推進、国研の研究成果の統合化をはかった。これと併せてシンポジ ウム、海外技術動向調査等を通じ情報収集・共有を協力に推進することを目的とした。

- 技術委員会による研究計画の審議、研究成果の把握・統合および技術情報交換 等を通じた研究開発の方向付け、進捗管理およびコンソーシアム全体の共通認 識の形成
- ② 研究進捗月次報告の発行
- ③ 要素技術(集中研)検討会の開催
- ④ シンポジウム開催による成果発表・討論による技術交流、プロジェクト成果の キャンペーン

⑤ 国内外における関連研究開発の情報収集

2. 成果報告

2.1 技術委員会

第1回技術委員会が平成12年6月21日、機械振興会館にて開催し、各SL、再委 託先の大学および国研より平成12年度実施計画の報告があり、活発な討論、意見交換 を経た上で原案どおり承認された。また平成12年度実行予算の最終設定値の報告が 事務局(RIMCOF)よりあり、確認された。なお、岸PLより、今年度のシンポジウム は、12月5,6日に予定されているが、今年度は中間評価の前年でもあるため、その 前哨戦であり、プロジェクト外の有識者を入れて密度の濃い討論ができるよう企画す るよう指示があった。

第2回技術委員会は、平成13年3月14日、機械振興会館にて開催された。岸PL は急用公務のため欠席されたが、各研究グループ(ヘルスモニタリング、スマートマニュファクチャリング、 アクティブ・アダプティブ構造、アクチュエータ材料・素子、デモンストレータ、ワシントン大学、産総研)より 平成12年度成果と平成13年度計画の説明があり、各グループの13年度の実施計画 は、了承された。なお、13年度から改組により創設される産業技術総合研究所スマ ート・ストラクチャー研究センターに、これまでに本プロジェクトを担当してきた国 研の研究者が集結し、スティフナつき CFRP 板(「より先進的な胴体構造要素デモンストレータ」) にセンサとアクチュエータを組み込み、これらの統合化技術と能動制御技術を集中的に行うとの 説明があった。

2.2 研究進捗月次報告

今年度より、プロジェクト参加の全研究参画機関の研究進捗状況をコンソーシアム の全研究者が把握、情報を共有するともに、研究管理を円滑に進めるために、月次報 告を編集を作成し、研究参加全機関および通商産業省(現経済産業省)、工業技術院、 NEDOの関係先に配布した。各 SL および再委託先の大学より、毎月の実施内容、翌 月の予定、問題点等を翌月 5 日までに RIMCOF に提出して頂き、これに RIMCOF の活動等を加え、編集した。

2.3 要素技術(集中研)検討会

各集中研で、年間3ないし4回、技術検討会、研修会あるいはワークショップとして、技術検討の場が持たれ、具体的な研究結果に基づく活発な討論が行われた。これには当該集中研のメンバーのみではなく他の集中研からの参加も得て、横断的な討論 も併せて行えるよう進めた。 2.4 第2回「知的材料・構造システム」シンポジウム

平成12年12月5日(火)、6日(水)の両日、(財)機械産業記念事業団、TEPIA ホー ルにおいて、第2回「知的材料・構造システム」シンポジウムが開催された。当該プ ロジェクトのこれまでの研究開発の総括としての成果の発表およびパネル討論を行 い、研究者相互の情報交換と成果を広く書く方面に紹介した。参加者は、200名を超 え、2日目最終の岸 輝雄 PL の総括まで、会場には多数の出席を得て、終始熱のこ もった発表、討論が行われた。

冒頭、PLより、今回のシンポジウムにおいては、各要素技術グループとも研究成 果の発表に加えて、研究分野の歴史的流れ、自グループ成果の世界的な位置付けを明 確にするよう指示されるとともに、4つの要素技術の到達点としてのデモンストレー タ試験に対する期待が述べられた。要素技術およびデモンストレータの各セッション では、研究発表に加えて、今回、パネル討議を採り入れ、プロジェクト外部の有識者 との討論を通じて今後の研究開発の方向を明らかにしようとした。なお、Fu-Kou Chan スタンフォード大学教授による特別講演「スマートセンシングによる構造信頼 性の革新」では知的スマート材料・構造技術、特に構造ヘルスモニタリング技術の将 来性、最近の技術動向等について言及された。

2.5 技術調查

本プロジェクトは、航空宇宙分野への応用を主要ターゲットの一つにしているゆえ に、他分野にもましてその成果は国内にとどまらず、世界的に見て先端レベルにある ことが要求される。本プロジェクトでは、広く国際的なシンポジウム・学会への参加、 有力企業および大学訪問調査等により技術者・研究者との交流を推進することにより、 技術情報の入手と成果の世界レベルでの認識の維持に努めることしている。特に、先 端的な関連産業技術については、企業間関係では技術情報が得にくいが、大学連携に よる中立性と基礎技術への指向の中で比較的容易になる面もあり、積極的に進めた。

表1に海外調査を総括的に要約し、個々の報告を添付した。なお、本年度の新たな 試みとして、SPIE 国際シンポジウムにプロジェクトの研究開発成果を展示し、積極 的に意見交換、情報収集の場を持った。展示ブースには 200 名を超える来訪者があ り、成功裡に終えた。

実施者	年月日	分野	実施先	国名	目 的	報告 No
元木信弥	2000.8.	SM	慶州市	韓国	スマート材料・構造に関す	S12-1
(大阪市立大	17		ヒルトンホテル		る研究開発動向調査、研究	- 1
学)	~ 8.21		8		発表(ACCM-2000 出席)	

表1 海外調查研究活動一覧

高坂達郎	2000.8.	SM	慶州市	韓国	同上	S12-1
(大阪市立大	17		ヒルトンホテル	[- 2
学)	\sim 8.21					
大島信雄	2000.8.	SM	慶州市	韓国	同上	S12-1
(大阪市立	17		ヒルトンホテル			- 3
大学)	~ 8.21					
岩城英朗	2000.10.	HM	〇FS国際	イタリア	光ファイバセンサ技術の最新技術	S12-2
(清水建設)	10~		会議(ベネチ	英国	動向の調査	
	10.18		ア)参加、			
		1	Lumen			
			Photonic 社			10
			(英)調査			
松崎雄嗣	2000.10.	AA	SSMS 国	中国	スマート構造に関する最新	S12·3
(名古屋大学)	18~		際シンポ ジ		動向調査、講演	
	10.20		ウム参加			
			(香港)			
宮崎崇夫	2000.11.	DM	マグネブル	ドイツ	ヨーロッパにおける知的材	S12-4
(RIMCOF)	$20\sim$	AA	グ大学	フランス	料・構造の最新研究開発動	
他2名	12.3	HM	EADS (31)	スイス	向の調査	
		SM	ヘン、パリ)	1917		
			ローザンヌ			
			大学			
			ローマ大学			
岩城英朗	2000.12.	HM	MOVIC E	オースト	構造物の振動制御等に関す	S12-5
(清水建設)	3~		際会議	ラリア	る MOVIC 国際会議参加・	
	12.10	?			研究発表、最新技術動向調	
					査	
高坂達郎	2001.3.2	SM	第3回日米	米国	スマートマニュファクチャリング技術の研	S12-6
(大阪市立大	~3.8		スマートワークショッ		究開発動向調査、研究発表	
学)			プ、SPIE 国			
		-	際シンポ ジ ウム			
長井謙宏	2001.3.4	DM	SPIE 国際シ	米国	ドモンストレーション試験に関連し	S12-7
(三菱重工業)	~3.8		ンポ ジ ウム		て、知的材料・構造に関す	
					る最新技術動向調査	

松崎雄嗣	2001.3.4	AA	第3回日米	米国	知的材料/構造システムに	S12-8
(名古屋大学)	\sim 3.9		スマートワークショッ		関する最新技術動向調査、	
他6名			7°、SPIE 国		アクティブ・アダプティブ構造グルー	
			際シンポ ジ ウム		プの成果発表	
宮崎崇夫	2001.3.3	DM,HM	第3回日米	米国	プロジェクト成果の海外へ	S12-9
(RIMCOF)	~3.10	SM,AA	スマートワークショッ		の紹介、反応調査、最新技	-1
他1名		AC	プ、SPIE 国		術動向調査	
			際シンポ ジ ウム			
桜井建夫	2001.3.3	DM,HM	SPIE 国際シ	米国	プロジェクト成果の展示、	S12-9
(RIMCO	\sim 3.10	SM,AA	フポジウム展示		関連技術の研究動向の調査	-2
F)他3名		AC				

 (注) HM:ヘルスモニタリング、SM:スマートマニュファクチャリング、AA:アクティブ・アダプティブ構造、AC:アクチュエータ材料・素子、 DM:デモンストレータ

2.6 再委託研究

集中研の要素技術研究を補完するために、大学への委託により次の再委託研究を実施した。

 スマート構造物の静粛化に関する研究(東京都立科学技術大学) 研究成果:本成果報告書 Ⅲ章 1.1.7 節に記載

② 新アクチュエータ材料の研究開発(ワシントン大学)

研究成果:本成果報告書 N章 1.1.5 節に記載

1. 調查目的

「スマートマニュファクチャリング技術の開発」に関する研究成果発表および海外情報の車 集を行う。

2. 調査員

大阪市立大学工学部知的材料工学科 教授 元木信弥

3. 調査期間

平成12年8月17日(木)~8月21日(月)

4. 調査場所とスケジュール

8月17日(木)	関西国際空港より出発
8月17日(木)~8月21日(月)	韓国、慶州市
8月21日(月)	韓国、釜山空港より帰国
8月21日(月)	関西空港到着

5. 調査報告書

韓国、慶州市で開催された、The Second Asian-Australasian Conference on Composite Materials に出席し、研究成果の講演発表およびスマート材料・構造に関する情報収集、出席した研究者との情報 交換を行った。

ACCM は複合材料に関するアジアにおける最も大きな国際会議のひとつで、スマート材料・構造に関 するセッションも設けられており、活発に発表が行われていた。報告者も、そのセッションにおい で'Novel Sensor Development for Resin front Detection in RTM'を発表した。

報告者は、主に圧電セラミクス、光ファイバ応用、複合材料成形法に関する研究を聴講した。このこ とにより、知的材料・構造システムプロジェクトを進める上で有用な多くの情報を得ることができ、大 きな収穫を得た。

6. まとめ

8月18日(日)~8月20日(日)韓国、慶州市で開催された The Second Asian-Australasian Conference on Composite Materials に出席し情報収集および成果発表を行った。今回の調査は、今後の知的材料・ 構造システムプロジェクトに関する研究を進める上で非常に有用であった。 1.調査目的

「スマートマニュファクチュアリング技術の開発」に関する海外情報収集を行う

2.調査員

大阪市立大学工学部知的材料工学科 助手 大島信生

3.調査期間

平成12年8月17日(木)~8月21日(月)

4.調査場所とスケジュール

8月17日	(木)	関西国際空港より出発
8月17日	(木)~8月21日(月)	韓国、慶州市
8月21日	(月)	韓国、釜山空港より帰国
8月21日	(月)	関西空港到着

5.調查報告書

韓国、慶州市で開催された、The Second Asian-Australasian Conference on Composite Materials に出席し、スマート材料・構造に関する情報収集および出席した研究者との情報交換を行った。

ACCM は複合材料に関するアジアにおける最も大きな国際会議のひとつで、スマート材料・構造に 関するセッションも設けられており、活発に数多くの発表が行われていた。報告者も、そのセッション において'Cure Monitoring for Fiber Reinforced Plastics by Piezoelectric Ceramics''に論文を投稿し、 直接指導している大学院生がこれを発表した。

報告者は、主に圧電セラミクス、光ファイバ応用、複合材料成形法に関する研究を聴講した。このこ とにより、知的材料・構造システムプロジェクトを進める上で有用な多くの情報を得ることができ、大 きな収穫を得た。

6.まとめ

8月18日(日)~8月20日(日)韓国、慶州市で開催された The Second Asian-Australasian Conference on Composite Materials に出席し情報収集および発表を行った。この結果、今回の調査は、 今後の知的材料・構造システムプロジェクトに関する研究を進める上で有用であると考えられる。 1. 調査目的

海外での国際学会(ACCM)における研究成果発表およびスマートマニュファクチャリング技術の開発 に関する海外情報収集

2. 調査員

大阪市立大学工学部 知的材料工学科 助手 高坂達郎

3. 調査期間

平成12年8月17日(木)~平成8年8月21日(月)

4. 調査場所とスケジュール

8月17日(木)	関西国際空港より出発
8月18日(金)~ 8月20日(日)	韓国,キョンジュ,キョンジュ Hilton Hotel
8月21日(月)	関西国際空港に到着

5. 調查報告内容

韓国, キョンジュ, キョンジュ Hilton Hotel で 8 月 18 日 (木) ~ 8 月 20 日 (日) に開催された, 2nd Asian-Australasian Conference on Composite Materials(ACCM-2000) に出席し, 3 件の論文 発表を行った. また, スマート材料・構造に関する最新の情報収集及び出席した研究者との技術情報交 換を行った.

ACCM は複合材料全般に関する、アジア諸国の研究者を中心とした国際会議であり、1998 年より隔 年で、アジア各都市にて行われている(第1回は、日本、大阪であった).近年、知的材料・構造に関 する研究が盛んになるとともに、先進材料の中でも複合材料に知的機能を付加したスマートコンポジッ トは次世代の材料としての期待が高まっている.ACCM においても、近年では知的複合材料に関する セッションが設けられるようになった.ACCM-2000 では、「Smart Materials and Structures」セッ ションにて 18 件の知的材料・構造に関する講演発表が行われた、機能性素材の基礎研究、材料・構造 との一体化に関する研究、SMA アクチュエータ、光ファイバセンサ、PZT センサ・アクチュエータ、 電歪・磁歪アクチュエータ、ER 流体アクチュエータ、そして CFRP の電気抵抗変化を用いた知的材料 構造に関する研究発表が行われた.

6. まとめ

8月18日(金)~ 8月20日(日)に韓国,キョンジュ,キョンジュ Hilton Hotel にて開催された 2nd Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-2000)に出席し,3件の論文発 表とスマートマニュファクチャリング技術の開発に関する情報収集を行った.本調査で得られた知見は 今後の研究活動に大いに役立つものと期待される. 1. 調查目的

光ファイバセンサ技術に関する代表的な国際会議であるOFS国際会議に参加し、光フ ァイバセンサ技術の最新技術情報を調査する。併せて、欧州の光ファイバセンサ、モニタ リング技術の調査を行う。

2. 調査員

岩城 英朗 (清水建設(株)技術研究所)

3. 調査期間

平成12年10月10日~10月18日

4. 調査場所とスケジュール

OFS国際会議(ベネチア)参加	(1	0	月	1	1	日~	1	3	日)
英国 Lumen Photonics 社調査	(1	0	月	1	6	日~	1	7	日)

5. 調查報告内容

5.1. OFS国際会議

光ファイバセンサに関する基礎的研究,適用例等,多数の研究発表を聴講し,研究者と の意見交換を行った。特筆すべき研究発表は以下の2編。

"Novel Fiber Optic Grating Acceleration Sensor Detection Scheme"

(Kraemmer P. (Siemens AG)他)

FBG 式加速度センサおよび測定手法に関する発表で,光学検知システムが非常にシンプルかつ参考にできるものがあった。

"Wavelength Interrogator Employing Arrayed Wavelength Grating for Distributed Fiber Bragg Sensors"

(Sano Y. (Fuji Electric Corporate Research and Development, Ltd.)他)

FBG 式センサの検知手法として AWG を用いたもので、今後の製品化に大きく期待できる 内容であった。

5. 2. 英国 Lumen Photonics 社

100KHz サンプリング可能という非常に高速な FBG 計測システムを有している,同社

のLukson Li 社長とLondon 市内で面談し、情報交換を行った。同社は小規模な企業であるため、当方の要求に応じた改変等が可能であること、更に、多重化、高速化等も可能である旨確認した。更に、2000 年冬に来日予定とのことで、再会を約束した。

6. まとめ・所感

本研究開発においては,主に米国の先端技術に注目してきたが,本国際会議の参加を 逆て,欧州の研究開発動向をキャッチすることが可能となった。今後は,欧州地域の先端 企業および大学との共同研究開発が可能か否か,模索していきたい。

一以上一

- 1. 調査目的 スマート構造研究に関する研究調査
- 調查員 松崎雄嗣 (名古屋大学大学院工学研究科)
- 調査時期
 2000年10月18日-20日
- 4. 調査場所

香港、Jockey Club

International Symposium on Smart Structures and Micro-Systems, October 19-21

5. 調査内容

初めて、我が国以外のアジア地域で開催されたスマート構造物に関する国際会議(ス マート構造物とマイクロシステム国際シンポジウム 2000) に参加して、特に香港を 中心とした中国におけるスマート構造物の研究開発についての動向調査を行った。 また、招待講演: Smart Structures and Materials Research in Japan を行って我 が国におけるスマート構造・材料の研究開発状況に付いて紹介を行い、参加者と研 究開発に関する情報交換を行った。

6. 国際シンポジウムの概要

講演発表は、香港・中国大陸からの発表を中心にして110件、そのうち欧米、日本からの招待講演者は筆者を含めて10人であった。下記のSessionのタイトルからも伺い知れるように、香港を中心とした中国における当該分野の研究活動の範囲は広く、またかなり進んでいるい事が実感された。中国の伝統的な陶磁器などの技術を踏まえ、今後のスマート材料研究の急速な進展が期待される。

Smart Structures 関連の主な Session のタイトルは、

Vibration and Noise Control Structural Control Smart Systems Smart Composites Health Monitoring Smart Materials and their Behaviors Smart Actuators and Motors Smart Sensors Actuator/Sensor Placement ER/MR Devices など 1. 調査目的

ヨーロッパにおける知的材料・構造の研究状況を調査し今後の研究の方向性を探る。

2. 調査員

RIMCOF	技術部長	宮崎崇夫
川際重工業	(株)構造研究グル-	ープ長 三田富雄
RIMCOF	研究員	中島未知
(本研究予算	算ではないが融合研究	岸所長、遠山研究員が参加。)

3. 調查期間

平成 12 年 11 月 20 日~12 月 3 日

- 4. 調査場所とスケジュール
 - 11月20日 成田空港発(宮崎、三田)
 - 11月22日 マグデブルグ大学訪問(宮崎、三田)
 - 11月24日EADS(ミュンヘン)訪問(宮崎、三田)ボン知的材料センタ訪問(中島)
 - 11月27日 ローザンヌ大学訪問(宮崎、三田、中島)
 - 11月29日 EADS (パリ)訪問(宮崎、三田、中島)
 - **12月1日** ローマ大学訪問(三田、中島)
 - 成田空港着(宮崎)
 - 12月3日 成田空港着(三田、中島)
- 5. 調查報告内容
 - 5.1 マグデブルグ大学
 - 現在、ドイツには産業界、大学それぞれを中心とする下記3つのスマート材料・ 構造システム関係のプロジェクトが進行中である。
 - i) Adaptive Mechanical Systems(ADAMES) : Magdeburg 大学および DLR 主体
 - ii) Leitprojekt ADAPTRONIK: EADS、Siemens、VW、DLR 等
 - iii) Adaptive Structures in Lightweight Construction and Aerospace : Stuttgart 大学
 - i) は6 MIL DM、ii) は50 MIL DM の規模である。いずれも5年計画で、 DLR(Germany Aerospace Center)が両方に参画している。
 - ② ADAMESのデモンストレータは騒音・振動制御が目的で、航空機・自動車・鉄道 車両・医療装置への適用を狙い、これらに共通の構造体にしたものであるが、現物は 限りなく航空機構造の模擬に近い。炭素繊維のフィラメント・ワインディングで円筒 を作り、内部には床板、ストリンガ、フレームが取り付けられている。直径は1m、長
さは 1.6m である。現在はデモンストレータの振動特性を調べている所であり、騒音・ 振動制御用のセンサ、アクチュエータの取り付けは 2001 年に実施する予定。

ADAMES プロジェクトは「アダプティブ構造」と称しているが、積層 CFRP パネ ルに光ファイバを埋め込んだ材料システムの静/動挙動評価、衝撃検知など、我が「知 的材料・構造システム」のヘルスモニタリング、スマート・マニュファクチャリング の内容も実施している。

5.2 EADS (ミュンヘン)

午前中はボラー氏をたずねスマート構造一般の情報交換およびスマートウイング の見学を実施した。2001年にEC135を使用してピエゾアクチュエータによる騒音軽 減、および振動軽減の試験飛行の計画があるとのことだった。またスマートウイング については他施設からわざわざ取り寄せて動くところを見せていただいた。この供試 体は双尾翼戦闘機の垂直尾翼を想定しバフェットによる振動を軽減しようとするも のである。長さは約2m、アルミのスパー、複合材のスキン、表面貼り付け型ピエゾ のアクチュエータからできている。ピエゾアクチュエータで加振した際はかなりな音 がしていた。

午後はニッチケ氏をたずね色々なアクチュエーティングデバイスを紹介してもらった。今回新しかったメカとしては図 5.2.2 に示すリンク機構を使ってアクチュエータの動きを直角方向に変換するものがあった。





図 5.2.1

図 5.2.2

5.3 ローザンヌエ科大学

ローザンヌ工科大学材料学科セラミックス研究室の E.L.Colla 博士を訪問した。 Colla 博士はアクティブ振動制御を目的として PZT 圧電セラミックスの薄膜化プロ セスと圧電特性評価および低コスト・アクチュエータの開発を行っていた。特に、 PZT セラミックスの結晶粒サイズ等の微細組織と圧電性との関連について詳細に研 究を行っており、高性能圧電セラミックスを作成するための基礎的研究に主眼を置い ていた。さらに、アプリケーションに関して、今後は振動制御のみではなく、医療用 分野への適用を目指した MEMS の開発を進めていくとのことであった。

5.4 EADS (パリ)

パリ郊外の研究所を訪問した。アエロ社については本プロジェクトに参加してお り研究内容も何度も紹介されているので印象に残った点だけ報告する。AEの飛行試験 は実際に飛ばしたそうである。回転翼関係ではエレクトロ・マグネチック・アクチュエ ータを用いたスマートロータブレードの飛行試験を来年実施するそうだ。このアクチュ エータはピエゾと比べ出力ストロークが大きく機械的増幅装置が必要ないのが特徴で ある。ここでも来年飛行試験という話であった。あと複合材関係の設備等彼らの能力の 一部を見学させてもらった。

6. まとめ・所感

ヨーロッパの企業、大学の知的材料・構造システムの研究を見て回ることができ非 常に参考になった。企業レベルでは日本よりかなり量的に進んでいるとの印象をも たざるを得なかった。 ただ要素技術レベルで見ると日本と比べ特に進んでいると の印象はなかったので予算さえあれば日本企業でもまだ十分伍していくことがで きるとの思いがした。大学に関してはマグデブルグ大学が大学らしくなくシスティ マティクに研究を進めているのが印象的であった。 1. 調査目的

構造物の振動制御等に関する国際会議であるMOVIC国際会議に参加し、本プロジェ クトの成果(高層建築物用ヘルスモニタリングシステム)の成果発表を行い、併せて最新 技術情報を調査する。

2. 調査員

岩城 英朗 (清水建設(株)技術研究所)

3. 調査期間

平成12年12月3日~12月10日

4. 調査場所とスケジュール

MOVIC国際会議(シドニー)参加(12月5日~8日)

- 5. 調查報告内容
- 5.1. MOVIC国際会議

同国際会議にて、本研究開発の成果発表を行った。ヘルスモニタリングに関する発表は ほとんどなく、一方、建築を含めた構造物の振動解析手法等に関する発表が多数あり、こ れらの発表から、当方が開発中の光ファイバセンサを用いたヘルスモニタリングシステム にて取得したデータを、如何に診断するか、という点で参考になった。

6. まとめ・所感

個々の研究発表で特筆すべき国際会議では必ずしもなかったが,本研究開発の成果発表 に対する質疑が活発であったことと,現在問題と考えているデータ取得後の診断手法等で 得られた情報は多かったと考えられる。

-以上-

1. 調査目的

海外での国際会議(第3回日米スマートワークショップ)にて研究成果発表,および国際学会 (SPIE-8th Annual Meeting - Smart Structures and Materials)におけるスマートマニュファクチャ リング技術の開発に関する海外情報収集

2. 調査員

大阪市立大学工学部 知的材料工学科 助手 高坂達郎

3. 調査期間

平成13年3月2日(金)~平成13年3月8日(木)

7. 調査場所とスケジュール

3月2日(金)関西国際空港より出発3月3日(土)~3月4日(日)Newport Beach,第3回日米スマートワークショップ3月4日(日)~3月6日(火)Newport Beach, SPIE 国際会議に出席3月8日(木)関西国際空港に到着

8. 調查報告内容

アメリカ合衆国、カリフォルニア州、ニューポート・ビーチ市(ロスアンゼルス市より、南へ自動車 で1時間)にて、3月3日(土)~3月4日(日)に開催された、第3回日米スマートワークショップ に出席し、1件の講演を行った.また、同市にて3月4日(日)~3月8日(木)に開催された SPIE-8th Annual Meeting - Smart Structures and Materials に3月4日(日)~3月6日(火)の期間にて出 席し、スマート材料・構造に関する最新の情報収集及び出席した研究者との技術情報交換を行った.

第3回日米スマートワークショップは、スマート材料の研究・開発に関する日米間の 情報交換を目的として行われてきた. 2001 年においては、アメリカ合衆国、カリフォルニア州、ニュ ーポート・ビーチ市にて、後述する SPIE-8th Annual Meeting - Smart Structures and Materials の 会議の開催日前日から、開催日正午まで行われた.本ワークショップでは、スマート材料の研究・開発 を推進している日米の研究者から 16 件の講演発表と活発な議論が行われた.

第3回日米スマートワークショップの後、3月4日(日)午後~3月8日(木)に、SPIE-8th Annual Meeting - Smart Structures and Materials が行われた.本会議は、スマート材料・構造全般に関する国際会議としては最大規模のものであり、アメリカ合衆国内外からの多くの研究者による講演発表が行われた.9個のセッションが同時に行われるため、光ファイバセンサを用いた知的材料・構造に関するセッションを中心に、情報収集を行った.

9. まとめ

3月3日(土)~3月6日(火)にアメリカ合衆国,ニューポート・ビーチ市にて開催された第3回 日米スマートワークショップおよび SPIE-8th Annual Meeting - Smart Structures and に出席し,1 件の論文発表とスマートマニュファクチャリング技術の開発に関する情報収集を行った.本調査で得ら れた知見は今後の研究活動に大いに役立つものと期待される. 1. 調査者

氏名:長井 謙宏

所属:三菱重工業(株) 名占屋航空宇宙システム製作所

2. 調査時期

2001年3月4日 ~ 2001年3月8日

- 3. 調査場所
 - SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structure and Materials
 - SPIE's 6th Annual International Symposium on NDE for Health Monitoring and Diagnostics (Newport Beach Marriott Hotel and Tennis Club : Newport Beach, California USA)
- 4. 調査目的

デモンストレータ試験に関連し、知的構造・材料に関する最新の技術動向について調査を行う。

5. 調查内容概要

今回参加したシンポジウムは、本カテゴリーにおける世界最大規模のもので、毎年開催されている. 発表数も Smart および NDE あわせて656件と桁違いに多いものである(その内約5%は当日キャンセルであった).

光ファイバに関するセンシングでは、そのほとんどがFBG(ファイバに刻まれた格子を利用した局所ひずみセンサ)に関するものがほとんどであった。FBGの技術自体は既に確立されているため、現在では多チャンネル化といかに実用的なシステムを構築するかに主眼がおかれている。中にはNASAのバックアップも受けている企業の3000個のFBGを光ファイバに入れる壮大な報告(原理的な数で実例は200程度)もあり、もはや実構造への適用を想定した実用化研究がなされている印象を受けた。ただし、ひずみ計測の一手法という位置づけであり、それによりどんな損傷をどの程度の精度で検出するかといった具体的な損傷検知に関する報告はなかった。

アクチュエータの分野ではピエゾとSMA(形状記憶合金)に関する研究が主流であった。ただ し、従来からの課題である、ピエゾによるアクチュエーティング荷重の小ささと、SMAの応答 性の鈍さについては、画期的な解決案は見られなかった。試験片レベルではよくても、実機レベ ルに適用するにはまだまだハードルが高いと思われる。DARPAの報告でも、大きなモデルでは結 局超音波モータなどの従来型のアクチュエータを使用している。

全体を通しての印象は、米国の発表では基礎研究に関する報告はあまりなく、実用化研究が多かった。それも、同じ課題に対し何人かの研究者が異なるアプローチで取り組むといった日本では考えられない開発体制がしかれており(日本では1つのアプローチを決めればそれで猪突猛進する)、懐の深さを感じた。米国以外では、カナダやヨーロッパあたりが後を追っており、航空宇宙機器に対してではないが、トンネル、ダム等のインフラストラクチャに対しては既に実用化されていた。アジアをはじめとする他の国々では特に注目すべき研究発表はなかった。

以上

1. 調查目的

第8回スマート構造物とスマート材料に関する国際シンポジウムにおいて知的材料・構造システムの研究開発(アクティブ・アダプティブ)の成果の発表を行うとともに、この分野での世界の動向を調査する。また、第3回日米スマートワークショップにおいてアクティブ・アダプティブグループの研究成果の紹介・意見交換、ボーイング社ロングビーチ工場において見学・意見交換を行う。

2. 調査員

名古屋大学大学院工学研究科 松崎雄嗣、 池田忠繁、 ビジャヤン・バブラジ 川崎重工業 岐阜技術研究所 高橋晃作 富士重工業 航空宇宙事業本部 町田茂、萩俊之 東芝 研究開発センター 長安克芳

3. 調査期間

平成13年3月4日~8日(松崎・バブラジ・町田・萩) 平成13年3月3日~8日(池田・長安) 平成13年3月4日~9日(高橋)

4. 調査場所とスケジュール

3月3日	コスタメサ・マリオットスイート
	第3回日米スマートワークショップ
3月4日	ニューポートビーチ・マリオットスイート
	第3回日米スマートワークショップ
3月4日~8日	ニューポートビーチ・マリオットホテル
	第8回スマート構造物とスマート材料に関する国際シンポジウム
3月9日	ボーイング社ロングビーチ工場
	見学・意見交換

5. 調查報告内容

5.1 日米スマートワークショップ(US-Japan Symposium on Smart Materials)

日米スマートワークショップは、知的材料・構造システム開発プロジェクトのリーダ である岸先生と、Naval ResearchのDr. Pohankaが中心となって開かれた。参加者は 25名程度のワークショップで、16件の講演が行われた。

講演では、アクティブ・アダプティブグループを代表し名古屋大学の池田が R&D of

Active adaptive Structural System Technology と題し、グループの研究成果を紹介した。

その中での質疑応答は、以下の通り。

- Q:SMA ワイヤによる片持ち梁の減衰改善に関し、SMA の代わりに銅ワイヤではどう なるか。
- A:銅は、形状記憶合金と比較し、応力-歪関係のヒステリシスが小さいので、大きな 減衰効果は期待できない。
- 5.2 第8回スマート構造物とスマート材料に関する国際シンポジウム

アクティブ・アダプティブグループでは下記の6件講演と展示会場にてビデオ上映を行った。以下に演題、講演概要および質疑応答を示す。

 Sound and Vibration Control Tests of Composite Plate by Using Piezoelectric Sensors and Actuators

K. Takahashi, K. Bansaku, T. Sanda, Y. Matsuzaki* (KHI, *Nagoya Univ.) CFRP 上に PZT を接着した小型構造供試体(600×600mm²)を用いて振動制御試 験、音響制御試験を実施し、目標値である減衰係数の 20%以上向上、音響パワーの 30%以上低減を達成した。

- Q:PZTのアクチュエータ能力に限界があるとはどういう意味か?
- A:印加電圧と発生歪みが線形性を有する電圧範囲には制限がある。その故、PZT のアクチュエータ能力には制限が生じる。今回の試験の印加電圧は-90V~90V であった。
- Q:LQG 制御ではなぜ中央部分のセンサーを用いたか?
- A:(1,1)、(1,3)振動モードのような対称モードをセンシングし抑制しようと考えて いたため。
- ② Vibration Control by Smart Structure with Electro-Rheological Fluid
 S. Machida, Y. Matsuzaki*, T. Hagi (FHI, *Nagoya Univ.)
 取得した電気粘性流体の試験データをもとにして、解析的に供試体(長さ800mm)
 - の減衰特性を評価し、目標である振動荷重50%低減が可能であることを示した。
 - Q:電気粘性流体の封入位置を母構造の外側にした時と、母構造の内側にした時と、 効果はどれくらい違うか。
 - A:定量的に評価していない。今年度内側に電気粘性流体を封入した供試体での試験を予定しているので、そこで評価したい。
 - Q:電気粘性流体特性の温度に対する影響はどのように考慮しているか。
 - A:本発表では考慮していない。電気粘性流体の特性が変化したとしても、電圧に よる制御により補正できると考えている。
- ③ Experimental Evaluation of Smart Structure with Electro-Rheological Fluid

T. Hagi, Y. Matsuzaki*, N. Oshima**, S. Machida (FHI. * Nagoya Univ., ** Osaka City Univ.)

製作した電気粘性流体の減衰特性取得試験結果と、電気粘性流体を用いた梁の減衰 特性改善に関する課題および対策について報告した。

Q:電気粘性流体の封人でシール材から溶媒が染み出るトラブルはなかったか。 A:溶媒が染み出ている。シール材の調査が必要である。

④ Analytical Modeling for Passive Damping in Smart Composites Using a Multicell Method

V. Baburaj, Y. Matsuzaki, F. Nae, T. Ikeda (Nagoya Univ.)

繊維と母材の間の中間層を考慮した複合材の減衰解析モデルを提案し、ガラス繊維 と形状記憶合金繊維など二種類の繊維を含む複合材の減衰解析を行った。

- Q:中間層はどのように決定するのか?
- A:円筒形の繊維の内接、外接正方形で囲まれた部分を基本とし、繊維含有率が0 ~1まで変化する関数で表している。
- ⑤ Unified Modeling of Thermomechanical Behavior of Shape Memory Alloys
 Y. Matsuzaki, H. Naito, T. Ikeda, (Nagoya Univ.)
 形状記憶合金の疑似弾性、形状記憶効果、R相の疑似弾性、形状記憶効果を統一的
 に表すことができる理論を提案し、その理論を用いた応力- 歪関係が実験データと
 - よく一致することを示した。
 - Q:比較した実験結果はどのように取得したのか?
 - A: 戸伏らの計測データを利用している。彼らは、形状記憶合金に関して、非常に 多く種類のデータを発表している。
- (6) Damping in SMA-reinforced Composites Using SMA-intrinsic Properties
 C. Boller, P. Konstanzer*, Y. Matsuzaki**, T. Ikeda** (EADS, *DaimlerChrysler, **Nagoya Univ.)

形状記憶合金を埋め込んで複合材料の減衰特性を向上させるために最適な形状記憶合金の状態、仕様を示した。

⑦ 柔軟アンテナ模擬構造物(直径1m)の位置・振動制御のビデオを上映した。 (Toshiba)

その他、特筆すべき演題

① スマートウィングに関する研究

DARPA/AFRL/NASAが実施しているスマートウィングに関する研究 発表が1セション使用して行なわれた。1995~1998年はフェーズ1の研究 段階でF/A18の主翼のスマート化の研究がなされていた。今回はフェーズ11と してB-2スピリットに似た形状の30%スケール模型を製作しスマートウィング に関する研究を行っていた。

研究の目的はヒンジレスの主翼後縁、変形する主翼前縁をスマート化により実現し、 L/D、マヌーバー特性、空力弾性特性の向上であった。研究内容については模型 が変わっただけのような感じであった。以下内容について説明する。

主翼後縁は6要素に分割されていて各要素毎に変形する。各要素の上下面内部(E /G)にそれぞれ28本のSMAワイヤを埋め込こむことで形状を変形させている。 無風状態で5deg変形に30秒、210V、4.1Aを必要としていた。現在、模型で風洞試験を実施中とのことであった。試験前に行った2次元モデルの計算シミ ュレーション結果を示して通常の操舵面よりCpが向上及び高いロールモーメント が得られると報告があった。(試験は4/1に終了予定)

30%スケール模型の主翼後縁には最大変形量で±20deg(3Hz)、マヌー バー時で±3deg(10Hz)の性能が要求されるため、応答速度に問題のある SMAワイヤーだけでなく積層型のPZTアクチュエータによる後縁駆動の研究も 行っていると紹介があった。

② 潜水艦の放射音軽減

今回の学会では航空機の胴体モデルを模擬したMITの機内騒音制御の発表はな かったが潜水艦内部からの放射音軽減制御の発表が同じくMITからなされた。潜 水艦胴体を模擬した肉厚の円筒模型にアクティブ・コンポジット・パネルを接着し た供試体を製作し放射音軽減試験に用いていた。供試体内部で加振器を設置して供 試体を加振し、水槽タンク内で供試体の表面加速度の軽減で放射音軽減の評価する 試験を実施したと報告された。

昨年の発表ではアクティブ・コンポジット・パネル内部の加速度センサにより観 測される加速度をアクチュエータにフィードバックしていたが、今回の発表では波 数をセンシングしてアクチュエータにフィードバックする制御方法(LQG制御) を用いたと説明があった。波数のセンシング方法についてはよく確認できなかった が、通常のLQG制御では構造モデルが必要且つ時間遅れ等が問題になるが波数を センシングする方法ではそれらを克服できるとの話しであった。(印刷物が発行さ れてから詳細の確認をおこないたい。)試験の結果、200~1600Hzの周波数 域で加速度の振動レベルを50%軽減できたようである。

③ アイソレーションに関する研究

PZTによるアクティブな振動・騒音及び形状制御よりもPZTによるアイソレ ーションに関する研究が増えてきている傾向を感じた。特定周波数(低周波数域)の 振動伝達を抑制する場合、重量、スペース、コストを考えた場合最も現実的で効果 があるものと考えられる。RLC電気回路によるアイソレーションの効果を補う形 でアクティブな要素を取込む形の発表が目立った。適用対象はロケット、自動車な どであった。

ここでは自動車を対象にshunt回路(RL電気回路)を用いて振動によりP ZTに発生する機械的エネルギーを電気的エネルギーに変換して振動を抑制し放射 音を抑制した研究について紹介する。

・供試体 : 500×400mmのスチール材の矩形板上に3つのPZTを接着した供試体を使用していた。

・制御方法:3つのPZTそれぞれに抑制する振動モードを分担させていた。各PZTに対して制御する振動モードの振動数に合わせてRL回路を作製し振動エネル ギーを散逸させ放射音抑制を試みていた。

・試験方法:供試体を装着したフレームを加振器で加振し、供試体から放射される 音をマイクで計測していた。

・制御効果:(3,1)、(1,5)モードでそれぞれ14dB、20dBの加速度の ピーク抑制が行えていた。0~450Hzの周波数域で4.7dBO.A.の音圧 レベルの軽減ができたと報告があった。

(4) Experimental study of active control of wave transmission through hollow cylindrical struts

I. Pelinescu(メリーランド大学)

この研究は、ヘリコプターのトランスミッションのノイズ(ギアボックスノイズ) を低減することを目的としている。今回の発表では、オープンループ制御の結果と クローズドループ制御を行った場合の予想を発表していた。また、世界のノイズ低 減プロジェクトとして以下のものを紹介していた。

ダイムラー 1998-2000

シコルスキー 1992-1998

ヨーロッパの合同プロジェクト 1993-1995

機体の適用例としてEH101、EC135をあげていた。

マグネティックPZT を用いている。

結果としては、2kHzまでの範囲に違うアクチュエータシステムが必要(圧電素子と マグネティックPZT)ということと、大変よい応答性が得られることがわかった。

(5) Development of a smart material active flap rotor

F. K. Starub(ボーイング)

ヘリコプタのローターにPZTアクチュエータで稼動するフラップを取付ける。将来 的にAH-64,V-22, RAH-66, FTR(VGART)に搭載する予定。PZTアクチュエータの サイズは11×11×120mmで、このアクチュエータによりフラップは上下6度づつ稼 動できる。その結果80%の振動低減、10%のBVI騒音の低減、10% gain in rotor 1ft/dragを得る。80万回の動作テストと1万回のGAG引張-ねじれ荷重テストを行 った。

5.3 ボーイング社ロングビーチ工場

3月9日(金)にボーイングロングビーチ工場にて工場見学、プレゼンテーション及び意見交換を行った。ここではボーイング側で行っているアクティブ・アダプティブ構造による機内騒音軽減の研究について紹介する。

吸音材(穴のあいたスポンジ状のもの)の内部に曲率を有したPVDFフィルムを埋 め込んだ要素を用いて航空機の機内騒音軽減の研究を行っていた。高周波数領域のノイ ズは吸音材、低周波数領域のノイズはPVDFにより、パッシブとアクティブで抑制す るというハイブリッド型を用いていた。制御方法及び試験結果に関してはスポンサーで あるNASAの許可なしでは説明できないということで詳細に関しては把握すること ができなかった。ただし、十分な騒音軽減を得られたという報告であった。

6. まとめ・所感

第3回日米スマートワークショップにおいて1件、第8回スマート構造物とスマート 材料に関する国際シンポジウムにおいて6件の研究発表とビデオ上映を行った。我々の グループが発表した研究成果は、国際的に見ても最高水準であった。

国際シンポジウムの特別講演では、3つのキーワード、IT、バイオ、ナノが連呼されていた。すでに、ナノテクノロジーを応用した材料開発や生物の機構をまねた構造システムの開発が行われ始めているようである。今後、アクティブ・アダプティブグループで得られた技術をマイクロマシンや医療機器分野などへ応用することも考えてみたい。

海外調查報告

\$12-9-1

- 1. 調査目的; 1. NED0「知的材料・構造システムの研究開発」プロジェクトの海外への紹介および反応調査
 - 2. 欧米の知的材料・構造システム研究状況及び動向の調査
- 2. 調査員 ;知的材料・構造システム研究開発センター 技術部長 宮崎 崇夫 同上 主幹研究員 櫻井 建夫
- 3. 調査機関;平成13年3月3日(土)~10日(土)
- 4. 調査場所とスケジュール;
 ①US-JAPAN SYMPOSIUM ON SMART MATRERIALS(3月4日AM、本件は宮崎のみ)
 ②SPIE's 8th International Symposium on *Smart Structures and Materials*@ Newport Beach Marriott Hotel and Tennis Club, Newport Beach, Ca. (3月4日AMを除く期間)
- 5. 調查報告内容;
 - 5.2 「知的材料·構造システムの研究開発」プロジェクトの紹介および反応調査
 - 1) <u>US-JAPAN SYMPOSIUM ON SMART MATRERIALS</u>;
 - ①本会議は原則、年1回、日本と米国回り持ちで開催される。前回は1999年9月にペンシルバニア州立大学で実施された。2000年は日本で開催予定であったが、都合で今回に変更された。
 - ②会議のタイトルとおり、"smart materials"が主体になるが、アプリケーションも含まれている。

今回は日米各8件、合計16件の発表があった。「知的材料・構造システムの研 究開発」プロジェクト関係では、各研究グループから4件およびデモンストレ ータ試験で計5件の発表であり、何れの発表にも米国側から熱心な質問があり、 本プロジェクトへの関心の強さを認識した。

- ③筆者は「The Concept Demonstrator Program of the "Smart Materials & Structures System Project in Japan"」のタイトルで発表し、米国側から 2件の質問を受けた。1件はボーイングの研究者からであり、騒音・振動制御 デモンストレータでの end cap の形状および考え方、他1件は MIT の Hagood 準教授からで、制御対象とする周波数領域はどの範囲かおよびその考え方に 関するものであった。
- 2) SPIE 会場での Exhibition

本件の詳細は櫻井主幹研究員の出張報 告に記載されているので細部は省略する。 会場の雰囲気を伝える写真を右に示す。 200部用意した配布資料が初日にほと んどなくなったのを始め、本プロジェク トに関するに関する関心点、質問、意見、 等のアンケートに50件以上の回答を得た。



3) <u>「知的材料・構造システム」プロジェクト関連プレゼンテーション@SPIE シン</u> ポジウム

本プロジェクト関連で20件を越える発表があった。全ての発表を聞く時間

的余裕はなかったが、幾つかの発表では会場から活発な意見・質問が出ていた。 これからも本プロジェクトに対する海外からの関心の高さが伺える。

- 5.2 欧米の知的材料・構造システム研究状況及び動向の調査@SPIE シンポジウム
- 1)極めて包括的に言うと、規模的にも分野的にも、昨年とほぼ同程度の印象をもった。
 - 本プロジェクトに関連する分野としては、
 - ①Modeling, Signal Processing, and Control in Smart Structures
 - ②Smart Structures and Integrated Systems
 - ③Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials
 - ④Electro-Active Polymer Actuators and Devices
 - ⑤Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways
 - ©Damping and Isolation
 - ⑦Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies
 ⑧Active Materials: Behavior and Mechanics
 - がある。この中で会場の関心が最も高いのは⑦であり、本シンポジウムがアプ リケーション志向であることが分かる。
- アプリケーション志向の発表の中で、本プロジェクトと予算・期間面で規模が 似ているドイツの "German industrial research project ADAPTRONIK: content, results, and outlook"の要旨を下記に記載する。
 - ①DLR(ドイツの航空宇宙件研究所)の Prof. Hanselka がリーダー
 - ② "ADAPTRONIK"の目的は、
 - Active Vibration-Noise Suppression
 - Active Shape Control
 - Active Position Control
 - Health Monitoring in Light Weight Structures

であり、材料·素子の開発に関するプログラムがなく、日本のプロジェクトよ りもアプリケーション志向が強い、といえる。

- ③1998. 7~2002. 12の5カ年計画であり、総額 50MIL DMの予定である。1 DM ≒55円として 30億円弱であり、日本よりやや金額的には少ない。
 組織構成は、10の研究所・大学、7つの中小企業、7つの大企業(ダイムラ
- ー・クライスラー、シーメンス、カールツァイス等)から成る。
- ④アプリケーションのプロトタイプとして
 - ・自動車⇒フォルクスワーゲンの天井板にセンサ/アクチュエータを入れ、騒 音低減
 - ・鉄道車両⇒ICE 用カップリングで台車部分での振動防止(ダイムラークライ スラー)
 - ・工作機械
 - ・医療機器⇒MRI/CTの騒音・振動低減
 - をターゲットに置いている。人工衛星の形状制御も視野に入れている。
- ⑤これまでに、Active Beam、 Hybrid Adaptive Control、等の基礎研究を進めており、パネルでは18.5dBの振動低減を果たした、とのこと。ただし、周波数領域は不明。

以上

1. 調查目的

世界の関連研究者が集合する SPIE シンポジウムに「知的材料・構造システムの研究開発」の成果を展示し、意見交換/情報収集調査実施の場とする。

2. 調査員

RIMCOF 知的材料・構造システム研究開発センター 主幹研究員 櫻井 建夫 RIMCOF 知的材料・構造システム研究開発センター 部長 宮崎 崇夫 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授 武田 展雄 東京大学 構造ヘルスモニタリンググループ 平野 滝子 (ご協力) 清水建設:山川、川崎重工;筒井、東大;岡部(友)、朴、武田、岡部(洋)

3. 調査期間

出張:平成13年3月3日(日)~10日(木)

4. 調査場所とスケジュール

SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials 場所:米国、加州、Newport Beach・Marriott Hotel

- 3月3日(土) 成田空港出発
 - 4日(日) テクノロジーオーバーヴュー聴講、出展物品輸送調整
 - 5日(月) 出展準備、ブース展開
 - 6日(火) 出展/調査
 - 7日(水) 出展/調查、終了後撤収
 - 8日(木) シンポジウム聴講
 - 9日(金) ロスアンジェルス空港出発
 - 10日(土) 成田空港到着

5. 調查報告内容

展示ブースに多くの来訪者あり、少々狭い難点はあったが展示品に多くの興味が注が れブースは意見交換/情報収集の場として大繁盛、大成功であった。

5-1 結果概要:

RIMCOFとして初の国際シンポジウムでのブース出展と研究内容展示を実施。 R1MCOF ブースへの来訪者200人以上と多く、研究成果の実物を展示することが来訪者の興味 を引き、多くの質問もあるなど展示出展は大変効果的かつ有意義であった。

研究内容の展示紹介が主体の RIMCOF 出展は他の販売活動主体のブースとは異色であり、それだけに当ブースへの訪問研究者達の注目を集めた。

「説明パネルの縮小版コピー」、「展示品の概要説明」および「RIMCOF 知的関連発表 テーマー覧表」を一式にし封筒に入れブース来訪者に配布したところ、用意の200部 は初日に殆ど配り切れてしまうほどの関心を得た。

NEDO/RIMCOF の知的材料・構造システム研究開発状況を今回具体的、効果的に紹介でき、またブースは意見交換/情報収集の場として機能した。またコメントなどを頂いた訪問者との今後のコンタクトにも多くの可能性が期待できる。(来場者コメント別紙)

- シンポジウム参加者数:約790名(スマート構造700名+NDE90名)
- ・ RIMCOF ブースへの来訪者数:200名以上(準備資料全て配布切れ)
- ・ コメント収集数:約60名分(コーヒーブレーク時に来訪者集中の傾向)
- ・ 研究発表原稿のコピーを各20部程度準備し配布。(好評)
- 5-2 出展概要:
- ・ 展示ブース、使用備品:ブース間口3メートル、奥行き2.4メートル、背面カー テンレール高さ2.4メートル。 備品はテーブル2、折畳み椅子4を使用(ブー ス2つ分の机と椅子使用)。 展示品の数に対しブース面積過小。



展示ブース全体イメージ

<右写真より> 背面トップの協会名「RIMCOF」は 小さすぎて存在感に欠けた。 研究内容説明パネルもこの様に並べ て見ると小さく、文字も細かすぎる事 が判明。 展示会用として焦点を絞る 必要を感じる。 パソコンによる活動写真(無声)は動 きがあって好評だがトーキーなら更 に良い。



・ アテンダントと出展準備作業人数:

展示時間内はアテンダント2名を常時張付け、出展準備と撤収作業時には武田 SL、 宮崎部長ほか武田研助手/学生4名と企業2名の作業応援を得る。

展示内容:

研究内容説明パネル5 (主要要素技術4+デモンストレータ1;報告末尾に添付) 展示品8項目(下記*印①~⑧)およびPCによる紹介動画展示(東芝宇宙アンテナ、 KHI 衝撃試験、日立電線FBGセンサ)

(*)展示品(提供元);①細径光ファイバ(日立電線)、②衝撃試験 CFRP パネル(KHI)、
 ③導電性ロッド変位センサ(JFCC)、④PNN-PZT ファイバ(東北大学)、⑤SMA ワイ
 ヤ/フォイル(関特/弘前大)、⑥SMA 内臓 CFRP 試験片(FHI)、⑦FBG 利用変位セン
 サ(清水建設)、⑧RTM 多機能センサ(大阪市立大)

関連分野	交流希望	情報希望	質問	興味分野	アドバイス等	計
光ファイバセンサ FBG	3	2	4	7		16
ヘルスモニタリンク SHM	3	1		2		6
製造センサMFS、成形		1	1	1		3
形状記憶合金 SMA		1		4		5
磁気歪み材料 MS			1	2		3
変位センサ DS			1	2		3
ピエゾ RZT	-			3		3
アコースティックエミッション AE				1		1
土木建築				3		3
修理				1		1
展示、一般ほか	3	3		17	3	26
合計	9	8	7	43	3	70

5-3 来訪者コメント概要(内容一覧別添):

来訪コメント者の多く(16/70=23%)は当方展示の中では光ファイバセンサに関心を 寄せ、情報などを期待している。 またヘルスモニタリングと光ファイバセンサには共 同研究希望などが寄せられた。

<ヘルスモニタリング>

情報交換希望 Prof. U. Gabbert マグデブルク大学 ドイツ 他共同研究希望 Mr. I. Orisamou ユナイテッドテクノロジー研究センター

共同開発希望 Mr. E. Udd ブルーロードリサーチ社 オレゴン このほか光ファイバーの提供依頼があった。

5-4 要改善/検討および反省点:

- 出展用テーブル1つ、標準備品、では展示不可能であった、今回と同程度の展示を 行うには1.8メートルのテーブル2つ必要。ブースレイアウト、テーブル配置も 再考を要す。
- ・ 展示パネルの説明文字は大きく、文字数を減らし簡略化要。 日本語併記を止め英 語だけにした方が見やすくて良い。
- ・ 展示内容の焦点を絞る。←研究の性格上無理かも知れないが一考を要す
- ・ 来訪者に「見せる」、「感じさせる」、そして「遊ばせる」ことで印象が更に好転する。
 例えば振動ダンピングを目の前で見せるなど実物の動くものが効果的。(今回実物展示 それ自体は非常に良かったが動きあればもっと良い)
- ・ アテンダント用の内容説明台詞の準備が大切。(説明したいポイントを専門用語で)
- コーヒーブレーク時には来訪者急増し個々に説明では間に合わない。 一対多対応 のプレゼンテーション/説明アナウンスの準備が要る。 展示物件とその研究報告書 を組み合わせて置いておき報告書のテイクアウトを自由にする事で凌ぐのも方法か。
- ・ RIMCOF、スマートマテリアル専用の青色封筒を準備し、封筒にキャンディーを貼り 付けて資料配布したのは好評で来訪者とのコミュニケーション円滑化に貢献。
- ・ RIMCOF のロゴを大きく横断幕にしたものをブースの看板として掲げることが望ましい。(何のブースかー目で分る様に)
- ・ 他のブースでピノキオをマスコットとして上手に使っているものがあり参考になった。 マスコットがその出展者のイメージを記憶に残させる効果を発揮している。

6. まとめ・所感

展示ブース出展が有意義であることを、今回再確認した。 次回 SPIE シンポジウム は2002年3月下旬にサンディエゴ(カリフォルニア)で開催される予定。 今回の 経験を踏まえ、より効果的な研究交流の場とすべくブース出展による研究内容展示を継 続実施することが望ましい。

SPIE 出展、来訪者コメント一覧

別紙

SPIE & NDE Technical Exhibition コメント集計

【2001年3月6、7日 於 ニューポートビーチ、マリオットホテル、カリフォルニアボールルーム】

(今後の交流を望む) E Ud President 当社では航空宇宙および一般構造物用の F86 (米国光カケボやせ) BLUE ROAD RESEARCH FBGを製造している。貴グルーブとの具 F86 の主要供給元) Fairway, 0R 同開発に関心がある。 F86 U. Gabbert OTO-VON-GUERICKE-UNIVESITAT 細径光ファイバー, 口筒状構造、及びへ SFM のまとめ役) MAGDEBURG INSTITUT FUR MECHANIK ルスモニタリング。 知径光ファイバー, 口筒状構造、及びへ SFM Magdeburg, GERMANY Magdeburg, GERMANY 今後の情報提供を望み、コンタクトをもちたい。 SFM I. R. Orisamou Manager SFMに大変興味があり、東大と共同研究 SFM WITED TECHNOLOGIES Research Center East Hartford, CT East Hartford, CT M. J. Atalla Research Engineer 同上。 SFM SFM UNITED TECHNOLOGIES Research Center たらい。 F#G 報 ENGINNERING LABORATORY WITED TECHNOLOGIES 大変興味深い研究である。今後も連絡を 一般情 N. Rajapakse Prof. Head of Department of Mechanical Engineer ing 大変興味深く、実用的な研究である。 株 全体的 こ M. Al-Bassyionni 所属不明 シクトシスシント) FBG アンタクトをとりたい。 に CULMBIA Department of Mechanical Engineering Yancuver, BC. CANADA A A <t< th=""><th>(今後の交流を望む) E. Udd Pre (米国光ファイバセンサ BLU の主要供給元) Fai U. Gabbert Pro (欧州の当分野 OTT のまとめ役) MAG Mag I. R. Orisamou Man UNI Res Eas M. J. Atalla Res UNI Res Eas</th><th>esident UE ROAD RESEARCH irway, OR of. TO-VON-GUERICKE-UNIVERSITAT GDEBURG INSTITUT FUR MECHANIK gdeburg GERMANY</th><th>当社では航空宇宙および一般構造物用の FBGを製造している。貴グループとの共 同開発に関心がある。 優秀な展示である。興味があるものは:</th><th>FBG</th></t<>	(今後の交流を望む) E. Udd Pre (米国光ファイバセンサ BLU の主要供給元) Fai U. Gabbert Pro (欧州の当分野 OTT のまとめ役) MAG Mag I. R. Orisamou Man UNI Res Eas M. J. Atalla Res UNI Res Eas	esident UE ROAD RESEARCH irway, OR of. TO-VON-GUERICKE-UNIVERSITAT GDEBURG INSTITUT FUR MECHANIK gdeburg GERMANY	当社では航空宇宙および一般構造物用の FBGを製造している。貴グループとの共 同開発に関心がある。 優秀な展示である。興味があるものは:	FBG
E tdd President 当社では航空宇宙および一般構造物用の FBG FBG の主要供給元) Fairway, OR 同開発に関心がある。 Fairway, OR 回開発に関心がある。 Prof. 優秀な展示である。興味があるものは: (欧州の当分野 FBG のTO-VON-GUERICKE-UNIVERSITAT 細径光ファイバー、円筒状構造、及びへ 知るDEBURG INSTITUT FUR MECHANIK NAGDEBURG INSTITUT FUR MECHANIK Nagdeburg, GERMANY SHM 1. R. Orisamou Manager SHMに大変興味があり、東大と共同研究 をしたい。 SHM 1. R. Orisamou Manager SHMに大変興味があり、東大と共同研究 をしたい。 SHM M. J. Atalla Research Engineer 同上。 SHM WITED TECHNOLOGIES Research Center Fast Hartford, CT FA M. J. Atalla Research Engineer 同上。 SHM WITED TECHNOLOGIES Research Center 大変興味深い研究である。今後も連絡を とりたい。 一般情 報 VINTED TECHNOLOGIES Research Center 大変興味深い研究である。今後も連絡を とりたい。 一般情 M. Al-Bassyionni 所属不明 Greenbelt, MD ンタクトをとりたい。 報 N. Rajapakse Prof. Head of Department of Mechanical Engineering Yancouver, BC. CANADA MSRUESARCE 研究成果を伺った。武田教授とそのスタ FBG A. Calabro (伊航空宇宙件 ITALIAN CENTER FOR AEROSPACE Wancouver, BC. CANADA 研究成果を伺った。武田教授とそのスタ FBG A. Calabro (伊航空宇宙件 ITALIAN CENTER FOR AEROSPACE Wancouver, BC. CANADA 研究成果を伺った。武田教授とそのスタ FBG A. Lopez- Higuera Head of Photonic Engineering Higuera	E. Udd Pre (米国光ファイバセンサ BLU の主要供給元) Fai U. Gabbert Pro (欧州の当分野 OTT のまとめ役) MAG Mag I. R. Orisamou Man UNI Res Eas M J. Atalla Res Eas K R Samant Res	esident UE ROAD RESEARCH irway, OR of. TO-VON-GUERICKE-UNIVERSITAT GDEBURG INSTITUT FUR MECHANIK gdeburg GERMANY	当社では航空宇宙および一般構造物用の FBGを製造している。貴グループとの共 同開発に関心がある。 優秀な展示である。興味があるものは:	FBG
(米国光ファイバセンヤ BLUE ROAD RESEARCH FBGを製造している。貴グルーブとの共 同開発に関心がある。 の主要供給元) Fairway, OR 同開発に関心がある。 (0, Gabbert) Prof. 優秀な展示である。興味があるものは: (0, Whの当分野) OTD-VON-GUERICKE-UNIVERSITAT 細径光ファイバー, 口筒状構造, 及びへ ルスモニタリング。 (0, Whの当分野) MAGDEBURG INSTITUT FUR MECHANIK Magdeburg, GERMANY ルスモニタリング。 1. R. Orisamou Manager いTED TECHNOLOGIES Research Center SBM East Hartford, CT East Hartford, CT East Hartford, CT K. R. Samant Research Center East Hartford, CT 同上。 N. J. Atalla Research Associate 大変興味深い研究である。今後も連絡を DIPONT CENTRU, Rab SCIENCE AND ENGINNERING LABORATORY SIM Wilmington, DE RIMCOFの製品に感銘を受けた。早々にコ Greenbelt, MD 一般情 報 N. Rajapakse Prof. Head of Department THE UNIVERSITY OF BRITISH COLU&BIA Department of Mechanical Engineering Vancouver, BC, CANADA H7?成成果を伺った。武田教授とそのスタ ンフが来る10月にイタリアで開かれるワ ークショップに参加して欲しい。 A. Calabro (伊航空宇宙件 ITALIAN CENTER FOR AEROSPACE (伊航空宇宙件 研究成果を伺った。武田教授とそのスタ ンフ) FBG J. M. Lopez- Head of Photonic Engineering Yangen UNIVERSITY OF Liguera 当方は光ファイバーの研究開発グループ FBG M. Jupez- Head of Photonic Engineering Higuera 当方は光ファイバーの研究開発グループ FBG	(米国光ファイバセンサ BLU の主要供給元) Fai U. Gabbert Pro (欧州の当分野 OTT のまとめ役) MAG Mag I. R. Orisamou Man UNI Res Eas M. J. Atalla Res Eas K. R. Samant Res	UE ROAD RESEARCH irway, OR of. TO-VON-GUERICKE-UNIVERSITAT GDEBURG INSTITUT FUR MECHANIK gdeburg GERMANY	FBGを製造している。貴グループとの共同開発に関心がある。 優秀な展示である。興味があるものは:	
の主要供給元) Fairway, OR 同開発に関心がある。 U. Gabbert Prof. 優秀な展示である。興味があるものは: FBG (欧州の当分野 OTTO-VON-GUERICKE-UNIVERSITAT 細径光ファイバー, 円筒状構造, 及びへ、SEM MacDEBURG INSTITUT FUR MECHANIK ルスモニタリング。 Magdeburg, GERMANY 今後の情報提供を望み、コンタクトをもちたい。 I. R. Orisamou Manager SIMIC大変興味があり、東大と共同研究 I. R. Orisamou Manager SIMIC大変興味があり、東大と共同研究 I. R. Orisamou NITED TECHNOLOGIES Research Center Research Engineer 回上。 SHM UNITED TECHNOLOGIES Research Center East Hartford, CT K. R. Samant Research Center East Hartford, CT K. R. Samant Research Associate 大変興味深い研究である。今後も連絡を 一般情 DUPONT CENTRAL R&D SCIENCE AND とりたい。 報 M. Al-Bassyionni 所属不明 CILMOUFの製品に感銘を受けた。早々にコ 一般情 Greenbelt, MD ンタクトをとりたい。 報 2 N. Rajapakse Prof. Head of Department 大変興味深く、実用的な研究である。株 Achenical Engineering Vaccouver, BC, CANDA A. Calabro ITALIAN CENTER FOR AEROSPACE 研究成果を伺った。武田教授とそのスタ (伊航空宇宙件 RESEARCH ツフが来る10月にイタリアで開かれるワ - (伊航空宇宙件 Ead of Photonic Engineering 当方は光ファイバーの研究開発グハーブ (アガン	の主要供給元) Fai U. Gabbert Pro (欧州の当分野 OTT のまとめ役) MAG Mag I. R. Orisamou Man UNI Res Eas M. J. Atalla Res UNI Res Eas	irway, OR of. TO-VON-GUERICKE-UNIVERSITAT GDEBURG INSTITUT FUR MECHANIK gdeburg GERMANY	同開発に関心がある。 優秀な展示である。興味があるものは:	
U. Gabbert (欧州の当分野 のTTO-VON-GUERICKE-UNIVERSITAT MAGDEBURG INSTITUT FUR MECHANIK Magdeburg. GERMANY 優秀な展示である。奥味があるものは: FBG 細径光ファイバー、円筒状構造、及びへ ルスモニタリング。 今後の情報提供を望み、コンタクトをも ちたい。 SFM I. R. Orisamou Manager Research Center East Hartford, CT SFMに大変興味があり、東大と共同研究 をしたい。 SFM M. J. Atalla Research Engineer UNITED TECHNOLOGIES Research Center East Hartford, CT 同上。 SFM M. J. Atalla Research Engineer UNITED TECHNOLOGIES Research Center East Hartford, CT 同上。 SFM M. J. Atalla Research Engineer UNITED TECHNOLOGIES Research Center East Hartford, CT 同上。 SFM K. R. Samant Research Associate DUPONT CENTRAL R&D SCIENCE AND EVGINVERING LABORATORY Wilnington, DE 大変興味深い研究である。今後も連絡を とりたい。 一般情 報 M. Al-Bassyionni Greenbelt, MD ンタクトをとりたい。 報 一般情 報 N. Rajapakse Prof. Head of Department THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA Department of Mechanical Engineering Vancouver, BC, CANADA 研究成果を伺った。武田教授とそのスタ ッフが来る10月にイタリアで聞かれるワ ークショップに参加して欲しい。 FBG A. Calabro (伊航空宇宙件 TIALIAN CENTER FOR AEROSPACE RESEARCH 研究成果を伺った。武田教授とそのスタ ッフが来る10月にイタリアで聞かれるワ ークショップに参加して欲しい。 FBG T. Lopez- Higuera Head of Photonic Engineering Group UNIVERSITY OF 当方は光ファイバーの研究開発グループ FBG	U. Gabbert Pro (欧州の当分野 OTT のまとめ役) MAG Mag I. R. Orisamou Man UNI Res Eas M J. Atalla Res UNI Res Eas K R Samant Res	of. TO-VON-GUERICKE-UNIVERSITAT GDEBURG INSTITUT FUR MECHANIK gdeburg GERMANY	優秀な展示である。興味があるものは: 2028年2月11日の日本の1月1日の日本の1月1日の日本の1月1日の日本の1月1日の日本の1月1日の日本の1月1日の日本の1月1日の日本の1月1日の日本の1月1日の日本の1月1日の日本の1月1日の日本の1月1日の日本の1	
(欧州の当分野 のまとめ役)OTTO-VON-GUERICKE-UNIVERSITAT MAGDEBURG INSTITUT FUR MECHANIK MAGDEBURG INSTITUT FUR MECHANIK Magdeburg, GERMANY 	(欧州の当分野 OTT のまとめ役) MAG Mag I. R. Orisamou Man UNI Res Eas M. J. Atalla Res UNI Res Eas K. R. Samant Res	TO-VON-GUERICKE-UNIVERSITAT GDEBURG INSTITUT FUR MECHANIK gdeburg GERMANY	タロクスンレーフェー インジョー ロコ ないはい 非性 と生 ニコレッド へい	FBG
のまとめ役) MAGDEBURG INSTITUT FUR MECHANIK Magdeburg, GERMANY ルスモニタリング。 今後の情報提供を望み、コンタクトをも ちたい。 1. R. Orisamou Manager UNITED TECHNOLOGIES Research Center East Hartford, CT SHM M. J. Atalla Research Engineer UNITED TECHNOLOGIES Research Center East Hartford, CT 同上。 K. R. Samant Research Associate DUPONT CENTRAL R&D SCIENCE AND ENGINNERING LABORATORY Wilnington, DE 大変興味深い研究である。今後も連絡を とりたい。 一般情 報 M. Al-Bassyionni 所属不明 Greenbelt, MD ンタクトをとりたい。 報 N. Rajapakse Prof. Head of Department THE UNIVERSITY OF BRITISH COLLWBIA Department of Mechanical Engineering Vancouver, BC, CANADA KRCOFの製品に感銘を受けた。 早々にコ ンタクトをとりたい。 一般情 報 A. Calabro (伊航空宇宙件 Higuera ITALIAN CENTER FOR AEROSPACE Group UNIVERSITY OF CANTABRIA 研究成果を伺った。 武田教授とそのスタ ッフが来る10月にイタリアで聞かれるワ ークショップに参加して欲しい。 FBG J. M. Lopez- Higuera Head of Photonic Engineering Group UNIVERSITY OF CANTABRIA 当方は光ファイバーの研究開発グループ アイバーを提供くださる FBG	のまとめ役) MAG Mag I. R. Orisamou Man UNI Res Eas M. J. Atalla Res UNI Res Eas K. R. Samant Res	GDEBURG INSTITUT FUR MECHANIK	細 () 加 () m () 加 () ()	SHM
Magdeburg, GERMANY 今後の情報提供を望み、コンタクトをもちたい。 I. R. Orisamou Manager UNITED TECHNOLOGIES SHMに大変興味があり、東大と共同研究 Research Center East Hartford, CT M. J. Atalla Research Engineer UNITED TECHNOLOGIES 同上。 Research Center East Hartford, CT K. R. Samant Research Associate DUPONT CENTRAL R&D SCIENCE AND とりたい。 ENGINNERING LABORATORY Wilmington, DE M. Al-Bassyionni 所属不明 Greenbelt, MD ンタクトをとりたい。 N. Rajapakse Prof. Head of Department THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA CULMBIA Department of Mechanical Engineering マガネる10月にイタリアで開かれるワ Vancouver, BC, CANDA 研究成果を伺った。武田教授とそのスタ A. Calabro ITALIAN CENTER FOR AEROSPACE (伊航空宇宙件 Canual ITALY (安望のあるコメント) TALIY J. M. Lopez- Head of Photonic Engineering Higuera Group UNIVERSITY OF CATABARIA CALabro CATABARIA CANDA	I. R. Orisamou Man UNI Res Eas M. J. Atalla Res UNI Res Eas K. R. Samant Res	odehuro GERMANY I	ルスモニタリング。	
ちたい。ちたい。I. R. OrisamouManagerSBMに大変興味があり、東大と共同研究UNITED TECHNOLOGIES Research Center East Hartford. CTたしたい。M. J. AtallaResearch Engineer UNITED TECHNOLOGIES Research Center East Hartford. CT同上。M. J. AtallaResearch Engineer UNITED TECHNOLOGIES Research Center East Hartford. CT同上。K. R. SamantResearch Associate DUPONT CENTRAL R&D SCIENCE AND ENGINNERING LABORATORY Wilmington, DE大変興味深い研究である。今後も連絡を とりたい。M. Al-Bassyionni所属不明 Greenbelt, MDRIMCOFの製品に感銘を受けた。早々にコ ンタクトをとりたい。一般情 報N. RajapakseProf. Head of Department THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA Department of Mechanical Engineering Vancouver, BC. CANADA研究成果を伺った。武田教授とそのスタ ソフが来る10月にイタリアで開かれるワ ークショップに参加して欲しい。FBG(伊航空宇宙中 BigueraHead of Photonic Engineering Group UNIVERSITY OF Grup UNIVERSITY OF CANTABELA CANABAL当方は光ファイバーの研究開発グルーブ ア電みと温度を測っている。研究室での 実験用に細径ファイバーを提供くださるFBG	I. R. Orisamou Man UNI Res Eas M. J. Atalla Res UNI Res Eas K. R. Samant Res	Sucouls, uniment	今後の情報提供を望み、コンタクトをも	
I. R. OrisamouManager UNITED TECHNOLOGIES Research Center East Hartford, CTSHMに大変興味があり、東大と共同研究 をしたい。SHMM. J. AtallaResearch Engineer UNITED TECHNOLOGIES Research Center East Hartford, CT同上。SHMM. J. AtallaResearch Engineer UNITED TECHNOLOGIES Research Center East Hartford, CT同上。SHMK. R. SamantResearch Associate DUPONT CENTRAL R&D SCIENCE AND ENGINNERING LABORATORY Wilmington, DE大変興味深い研究である。今後も連絡を とりたい。一般情 報M. Al-Bassyionni所属不明 Greenbelt, MDNEWNEW一般情 報N. RajapakseProf. Head of Department THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA Department of Mechanical Engineering Vancouver, BC. CANADAKM?c成果を伺った。武田教授とそのスタ ッフが来る10月にイタリアで開かれるワ ークショップに参加して欲しい。FBGA. Calabro (伊航空宇宙件 HigueraITALIAN CENTER FOR AEROSPACE Group UNIVERSITY OF CANTABRIA研究成果を伺った。武田教授とそのスタ ッフが来る10月にイタリアで開かれるワ ークショップに参加して欲しい。FBGJ. M. Lopez- HigueraHead of Photonic Engineering Group UNIVERSITY OF CANTABRIA当方は光ファイバーの研究開発グループ ア長FBG	I. R. Orisamou Man UNI Res Eas M. J. Atalla Res UNI Res Eas K. R. Samant Res		ちたい。	
UNITED TECHNOLOGIES Research Center East Hartford, CT をしたい。 M. J. Atalla Research Engineer UNITED TECHNOLOGIES Research Center East Hartford, CT 同上。 K. R. Samant Research Associate DUPONT CENTRAL R&D SCIENCE AND ENGINNERING LABORATORY Wilmington, DE 大変興味深い研究である。今後も連絡を とりたい。 M. Al-Bassyionni 所属不明 Greenbelt, MD RIMCOFの製品に感銘を受けた。早々にコ シタクトをとりたい。 一般情 報 N. Rajapakse Prof. Head of Department THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA Department of Mechanical Engineering Vancouver, BC. CANDA 大変興味深く、実用的な研究である。共 全体的 に 全体的 に A. Calabro (伊航空宇宙件 Biguera ITALIAN CENTER FOR AEROSPACE Group UNIVERSITY OF CANTABRIA 研究成果を伺った。武田教授とそのスタ アグ FBG J. M. Lopez- Higuera Head of Photonic Engineering Group UNIVERSITY OF 当方は光ファイパーの研究開発グループ FBG FBG	UNI Res Eas M. J. Atalla UNI Res Eas K. R. Samant Res	nager	SHMに大変興味があり、東大と共同研究	SHM
Research Center East Hartford, CTFBGM. J. AtallaResearch Engineer UNITED TECHNOLOGIES Research Center East Hartford, CT同上。M. J. AtallaResearch Engineer UNITED TECHNOLOGIES Research Center East Hartford, CT同上。K. R. SamantResearch Associate DUPONT CENTRAL R&D SCIENCE AND ENGINNERING LABORATORY Wilmington, DE大変興味深い研究である。今後も連絡を とりたい。M. Al-Bassyionni所属不明 Greenbelt, MDRIMCOFの製品に感銘を受けた。早々にコ ンタクトをとりたい。一般情 報N. RajapakseProf. Head of Department THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA Department of Mechanical Engineering Vancouver, BC. CANADARIMCOFの製品に感銘を受けた。早々にコ シタクトをとりたい。一般情 和A. Calabro (伊航空宇宙件 BSEARCH のトップ)ITALIAN CENTER FOR AEROSPACE Capua, ITALY研究成果を伺った。武田教授とそのスタ アブボ来る10月にイタリアで開かれるワ ークショップに参加して欲しい。FBGI. M. Lopez- HigueraHead of Photonic Engineering Group UNIVERSITY OF CANTABRIA CANTABRIA CANTABRIA CANTABRIA CANTABRIA CANTABRIA当方は光ファイバーの研究開発グループ FBGFBG	Res Eas M. J. Atalla UNI Res Eas K. R. Samant Res	ITED TECHNOLOGIES	をしたい。	
East Hartford, CTM. J. AtallaResearch Engineer UNITED TECHNOLOGIES Research Center East Hartford, CT同上。K. R. SamantResearch Associate DUPONT CENTRAL R&D SCIENCE AND ENGINNERING LABORATORY Wilmington, DE大変興味深い研究である。今後も連絡を とりたい。M. Al-Bassyionni所属不明 Greenbelt, MDRIMCOFの製品に感銘を受けた。早々にコ ンタクトをとりたい。一般情 報N. RajapakseProf. Head of Department THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA Department of Mechanical Engineering Vancouver, BC. CANADARIMCOFの製品に感銘を受けた。早々にコ シタクトをとりたい。一般情 報A. Calabro (伊航空宇宙件 のトップ)ITALIAN CENTER FOR AEROSPACE RESEARCH Capua, ITALY研究成果を伺った。武田教授とそのスタ ッフが来る10月にイタリアで開かれるワ ークショップに参加して欲しい。FBGJ. M. Lopez- HigueraHead of Photonic Engineering Group UNIVERSITY OF CANTABRIA当方は光ファイパーの研究開発グループ 下番みと温度を測っている。研究室での 実験用に細径ファイバーを提供くださる としたいたかFBG	Eas M. J. Atalla Res UNI Res Eas K. R. Samant Res	search Center		
M J. Atalla Research Engineer UNITED TECHVOLOGIES Research Center East Hartford, CT K. R. Samant Research Associate DUPONT CENTRAL R&D SCIENCE AND ENGINNERING LABORATORY Wilmington, DE M Al-Bassyionni 所属不明 Greenbelt, MD N. Rajapakse Prof. Head of Department THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA Department of Mechanical Engineering Vancouver, BC, CANADA A. Calabro (伊航空宇宙件 RESEARCH OF, J) J. M. Lopez- Higuera Higuera M J. Atalla Research Engineering Higuera M J. Atalla Research Center East Hartford, CT K. R. Samant Research Associate 大変興味深い研究である。今後も連絡を 大変興味深い研究である。今後も連絡を 一般情 報 RIMCOFの製品に感銘を受けた。早々にコ -分クトをとりたい。 和 大変興味深く、実用的な研究である。共 和 全体的 に PRG 中分片をさりたい。 和 和 日研究も考えられる。 FBG FBG FBG FBG FBG	M. J. Atalla Res UNI Res Eas K. R. Samant Res	st Hartford, CT		
UNITED TECHNOLOGIES Research Center East Hartford, CT大変興味深い研究である。今後も連絡を しUPONT CENTRAL R&D SCIENCE AND ENGINNERING LABORATORY Wilmington, DE大変興味深い研究である。今後も連絡を とりたい。一般情 報M. Al-Bassyionni所属不明 Greenbelt, MDRIMCOFの製品に感銘を受けた。早々にコ ンタクトをとりたい。一般情 報N. RajapakseProf. Head of Department THE UNIVERSITY OF BRITISH COLLMBIA Department of Mechanical Engineering Vancouver, BC, CANADARIMCOFの製品に感銘を受けた。早々にコ ンタクトをとりたい。一般情 報A. CalabroITALIAN CENTER FOR AEROSPACE (伊航空宇宙件 Oトップ) Capua, ITALY研究成果を伺った。武田教授とそのスタ ッフが来る10月にイタリアで開かれるワ ークショップに参加して欲しい。FBGI. M. Lopez- HigueraHead of Photonic Engineering Group UNIVERSITY OF CANTABRIA当方は光ファイバーの研究開発グループ で歪みと温度を測っている。研究室での 実験用に細径ファイバーを提供くださる にFBG	UNI Res Eas K R Samant Res	search Engineer	同上。	SHM
Research Center East Hartford, CT大変興味深い研究である。今後も連絡を とりたい。K. R. SamantResearch Associate DUPONT CENTRAL R&D SCIENCE AND ENGINNERING LABORATORY Wilmington, DE大変興味深い研究である。今後も連絡を とりたい。一般情 報M. Al-Bassyionni所属不明 Greenbelt, MDRIMCOFの製品に感銘を受けた。早々にコ ンタクトをとりたい。一般情 報N. RajapakseProf. Head of Department THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA Department of Mechanical Engineering Vancouver, BC, CANADA大変興味深く、実用的な研究である。共 全体的 同研究も考えられる。全体的 にA. Calabro (伊航空宇宙件 (伊航空宇宙件 Oトップ)ITALIAN CENTER FOR AEROSPACE RESEARCH (JPUN)研究成果を伺った。武田教授とそのスタ ッフが来る10月にイタリアで開かれるワ ークショップに参加して欲しい。FBGJ. M. Lopez- Head of Photonic Engineering Higuera当方は光ファイバーの研究開発グループ で歪みと温度を測っている。研究室での 実験用に細径ファイバーを提供くださるFBG	Res Eas K R Samant Res	ITED TECHNOLOGIES		
East Hartford, CTK. R. SamantResearch Associate DUPONT CENTRAL R&D SCIENCE AND ENGINNERING LABORATORY Wilmington, DE大変興味深い研究である。今後も連絡を とりたい。一般情 報M. Al-Bassyionni所属不明 Greenbelt, MDRIMCOFの製品に感銘を受けた。早々にコ ンタクトをとりたい。一般情 報N. RajapakseProf. Head of Department THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA Department of Mechanical Engineering Vancouver, BC, CANADARIMCOFの製品に感銘を受けた。早々にコ シタクトをとりたい。一般情 報A. Calabro (伊航空宇宙件 (伊航空宇宙件 (伊航空宇宙件 (要望のあるコメント)ITALIAN CENTER FOR AEROSPACE RESEARCH Capua, ITALY研究成果を伺った。武田教授とそのスタ ッフが来る10月にイタリアで開かれるワ ークショップに参加して欲しい。FBG(要望のあるコメント)当方は光ファイバーの研究開発グループ 実験用に細径ファイバーを提供くださる と助すたいFBG	Eas K R Samant Res	search Center		
K. R. SamantResearch Associate DUPONT CENTRAL R&D SCIENCE AND ENGINNERING LABORATORY Wilmington, DE大変興味深い研究である。今後も連絡を とりたい。一般情 報M. Al-Bassyionni所属不明 Greenbelt, MDRIMCOFの製品に感銘を受けた。早々にコ ンタクトをとりたい。一般情 報N. RajapakseProf. Head of Department THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA Department of Mechanical Engineering Vancouver, BC, CANADA大変興味深く、実用的な研究である。共 全体的 同研究も考えられる。全体的 にA. Calabro (伊航空宇宙件 のトップ)ITALIAN CENTER FOR AEROSPACE Capua, ITALY研究成果を伺った。武田教授とそのスタ ッフが来る10月にイタリアで開かれるワ ークショップに参加して欲しい。FBG で置みと温度を測っている。研究室での 実験用に細径ファイバーを提供くださる と たれざたか	K R Samant IRes	st Hartford, CT		
DUPONT CENTRAL R&D SCIENCE AND ENGINNERING LABORATORY Wilmington, DEとのたい。報M. Al-Bassyionni Greenbelt, MD所属不明 Greenbelt, MDRIMCOFの製品に感銘を受けた。早々にコ ンタクトをとりたい。一般情 報N. RajapakseProf. Head of Department THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA Department of Mechanical Engineering Vancouver, BC, CANADA大変興味深く、実用的な研究である。共 同研究も考えられる。全体的 にA. Calabro (伊航空宇宙件 のトップ)ITALIAN CENTER FOR AEROSPACE RESEARCH Capua, ITALY研究成果を伺った。武田教授とそのスタ ッフが来る10月にイタリアで開かれるワ ークショップに参加して欲しい。FBGJ. M Lopez- HigueraHead of Photonic Engineering Group UNIVERSITY OF CANTABRIA当方は光ファイバーの研究開発グループ 実験用に細径ファイバーを提供くださる し、たわざたいFBG		search Associate	大変興味深い研究である。今後も連絡を	一般情
ENGINNERING LABORATORY Wilmington, DERIMCOFの製品に感銘を受けた。早々にコ ンタクトをとりたい。一般情 報M. Al-Bassyionni Greenbelt, MD所属不明 Greenbelt, MDRIMCOFの製品に感銘を受けた。早々にコ ンタクトをとりたい。一般情 報N. RajapakseProf. Head of Department THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA Department of Mechanical Engineering Vancouver, BC. CANADA大変興味深く、実用的な研究である。共 同研究も考えられる。全体的 にA. Calabro (伊航空宇宙件 のトップ)ITALIAN CENTER FOR AEROSPACE Capua, ITALY研究成果を伺った。武田教授とそのスタ ッフが来る10月にイタリアで開かれるワ ークショップに参加して欲しい。FBGJ. M. Lopez- HigueraHead of Photonic Engineering Group UNIVERSITY OF CANTABRIA当方は光ファイバーの研究開発グループ で歪みと温度を測っている。研究室での 実験用に細径ファイバーを提供くださるFBG	DUP	PONT CENTRAL R&D SCIENCE AND	とりたい。	報
Wilmington, DERIMCOFの製品に感銘を受けた。早々にコー般情 なeenbelt, MDM. Al-Bassyionni所属不明 Greenbelt, MDRIMCOFの製品に感銘を受けた。早々にコー般情 報N. RajapakseProf. Head of Department THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA Department of Mechanical Engineering Vancouver, BC, CANADA大変興味深く、実用的な研究である。共 同研究も考えられる。全体的 にA. Calabro (伊航空宇宙件 のトップ)ITALIAN CENTER FOR AEROSPACE RESEARCH Oトップ)研究成果を伺った。武田教授とそのスタ アブが来る10月にイタリアで開かれるワ ークショップに参加して欲しい。FBGJ. M Lopez- HigueraHead of Photonic Engineering Group UNIVERSITY OF CANTABRIA COLUMER FOR AEROSPACE当方は光ファイバーの研究開発グループ アズンーを提供くださるFBG	ENG	GINNERING LABORATORY		
M. Al-Bassyionni 所属不明 Greenbelt, MD N. Rajapakse Prof. Head of Department THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA Department of Mechanical Engineering Vancouver, BC. CANADA A. Calabro (伊航空宇宙件 のトップ) J. M Lopez- Higuera Had of Photonic Engineering Group UNIVERSITY OF CANTABRIA COLUMBIA Department of Mechanical Engineering Vancouver, BC. CANADA A. Calabro (伊航空宇宙件 Group UNIVERSITY OF Capua, ITALY Columbia Group UNIVERSITY OF CANTABRIA COLUMBIA Department of Mechanical Engineering Head of Photonic Engineering Group UNIVERSITY OF CANTABRIA Columbia Columbi	W1 II	Imington, DE		617.144
Greenbelt, MDンタクトをとりたい。報N. RajapakseProf. Head of Department THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA Department of Mechanical Engineering Vancouver, BC, CANADA大変興味深く、実用的な研究である。共 同研究も考えられる。全体的 にA. Calabro (伊航空宇宙件 のトップ)ITALIAN CENTER FOR AEROSPACE Capua, ITALY (要望のあるコメント)研究成果を伺った。武田教授とそのスタ リフが来る10月にイタリアで開かれるワ ークショップに参加して欲しい。FBGJ. M. Lopez- HigueraHead of Photonic Engineering Group UNIVERSITY OF CANTABRIA CANTABRIA当方は光ファイバーの研究開発グループ 実験用に細径ファイバーを提供くださるFBG	M. Al-Bassylonni 所属	属不明	RIMCOFの製品に感銘を受けた。早々にコ	一般情
N. RajapakseProf. Head of Department THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA Department of Mechanical Engineering Vancouver, BC, CANADA大変興味深く、実用的な研究である。共全体的 にA. Calabro (伊航空宇宙件 のトップ)ITALIAN CENTER FOR AEROSPACE Capua, ITALY研究成果を伺った。武田教授とそのスタ ッフが来る10月にイタリアで開かれるワ ークショップに参加して欲しい。FBGJ. M. Lopez- HigueraHead of Photonic Engineering Group UNIVERSITY OF CANTABRIA当方は光ファイバーの研究開発グループ で歪みと温度を測っている。研究室での 実験用に細径ファイバーを提供くださるFBG	Gre	eenbelt, MD	ンタクトをとりたい。	<u> </u>
Infle UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA Mechanical Engineering Vancouver, BC, CANADA回研究も考えられる。にA. Calabro (伊航空宇宙件 のトップ)ITALIAN CENTER FOR AEROSPACE RESEARCH (apua, ITALY研究成果を伺った。武田教授とそのスタ ッフが来る10月にイタリアで開かれるワ ークショップに参加して欲しい。FBG(要望のあるコメント)(要望のあるコメント)J. M Lopez- HigueraHead of Photonic Engineering Group UNIVERSITY OF CANTABRIA CANTABRIA当方は光ファイバーの研究開発グループ で歪みと温度を測っている。研究室での 実験用に細径ファイバーを提供くださる	N. Rajapakse Pro	of. Head of Department	大変興味深く、実用的な研究である。共同研究はまた。	全体的
COLLMBIADepartment of Mechanical Engineering Vancouver, BC, CANADAA. CalabroITALIAN CENTER FOR AEROSPACE (伊航空宇宙件 のトップ)研究成果を伺った。武田教授とそのスタ ッフが来る10月にイタリアで開かれるワ ークショップに参加して欲しい。のトップ)Capua, ITALY (要望のあるコメント)ークショップに参加して欲しい。J. M. Lopez- HigueraHead of Photonic Engineering Group (ANTABRIA UNIVERSITY OF CANTABRIA当方は光ファイバーの研究開発グループ 下路	IHE	E UNIVERSITY OF BRITISH	同研究も考えられる。	kú.
Mechanical Engineering Vancouver, BC, CANADAMechanical Engineering Vancouver, BC, CANADAA. Calabro (伊航空宇宙件 のトップ)ITALIAN CENTER FOR AEROSPACE RESEARCH (apua, ITALY (要望のあるコメント)研究成果を伺った。武田教授とそのスタ ッフが来る10月にイタリアで開かれるワ ークショップに参加して欲しい。J. M. Lopez- HigueraHead of Photonic Engineering Group UNIVERSITY OF CANTABRIA CANTABRIA当方は光ファイバーの研究開発グループ で歪みと温度を測っている。研究室での 実験用に細径ファイバーを提供くださる	CUL	LUMBIA Department of		
Vancouver, BC, CANADAA. CalabroITALIAN CENTER FOR AEROSPACE研究成果を伺った。武田教授とそのスタ(伊航空宇宙件RESEARCHッフが来る10月にイタリアで開かれるワのトップ)Capua, ITALYークショップに参加して欲しい。(要望のあるコメント)J. M. Lopez-Head of Photonic Engineering当方は光ファイバーの研究開発グループHigueraGroupUNIVERSITY OFで歪みと温度を測っている。研究室での 実験用に細径ファイバーを提供くださる	Mec.	chanical Engineering		
A. Calabro (日和LIAN CENTER FOR AEROSPACE 研究成果を同うた。武田教授とそのスタ FBG (伊航空宇宙件 RESEARCH ッフが来る10月にイタリアで開かれるワ ークショップに参加して欲しい。 (要望のあるコメント) J. M. Lopez- Head of Photonic Engineering Group UNIVERSITY OF で歪みと温度を測っている。研究室での 実験用に細径ファイバーを提供くださる		ILLAN CENTER FOR AFROSDACE	四次は田さ月 た 寺田牧垣してのフク	EDC
(伊航空宇宙件 のトップ)RESEARCH(サフが来る10月にイタリアで開がれるり ークショップに参加して欲しい。(要望のあるコメント)J. M. Lopez- HigueraHead of Photonic Engineering Group CANTABRIAUNIVERSITY OF CANTABRIAご在り、この時に、日本的ですよい	A. Ualabro	ALIAN CENTER FUR AERUSPACE	研究成果を何つた。武田教授とての人ダ	rbu
OF (apua, TAL) ロクショックに参加して欲しい。 (要望のあるコメント) (要望のあるコメント) J. M. Lopez- Higuera Head of Photonic Engineering Group UNIVERSITY OF CANTABRIA 当方は光ファイバーの研究開発グループ FBG で歪みと温度を測っている。研究室での 実験用に細径ファイバーを提供くださる	(伊航空手由件 KES		ツノが米る10月にイタリアで開かれるワ	
(要望のあるコメンド)J. M. Lopez-Head of Photonic EngineeringHigueraGroupUNIVERSITY OFCANTABRIAStateCANTABRIACANTABRIALasta	$(0 \cap y /)$ [Uap]	pud, ITALI		J
J. M. Lopez- Higuera Group UNIVERSITY OF で歪みと温度を測っている。研究室での CANTABRIA 実験用に細径ファイバーを提供くださる		r) ad of Dhotonia Engineering	坐士け来ファイバーの四次四次 ゲループ	FRC
Iniguera Group ONIVERSITION CEのこ価度を使うている。の元単での CANTABRIA 実験用に細径ファイバーを提供くださる	J. M. LOPEZ- Hea	au of Photonic Engineering	ヨカはルノナイハーの切九囲光クルーノ	1.DA
CANADATA $ $	niguera GIO	OUP UNIVERSITI OF	し主のこ価反を回うしいる。何九里しの 実験田に知怒ファイバーを提供くださる	
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	CAN	NIADRIA ntandor SDAIN	天駅市に相任ノアイバーを延供てたとる	
Salitalidel, Statis C、のりがたい。 D. W. Ologinal: 甘花田北海紋方 IDC/2月オス桂起が没しい	D W Oleainaki ttá	intalluel, SFAIN 法担义演复合	C、 $のり N C V :=DD C U = 閉 + ス 信 起 が 20 1 1 x$	FDC
A. W. UICSIIISKI 121/11/12日建程6 100/CI天937月報がなしい。 100/CI天937日報がなしい。 100/CI天937日報がない。 100/CI天937日報がない。 100/CI天937日報がない。 100/CI天937日報がない。 100/CI天937日報がない。 100/CI天937日報がない。 100/CI天937日報がない。 100/CI天937日報がない。 100/CI天937日報がない。	R. W. UIUSIIISKI 日文作	1111日11年7月日 陈玉姿な司会部 111日本の11日	TDUYに因りる旧刊/小人しょ。	1.00
▲ 小 座 里 貝 17 円 17 円 17 丁 1 X 11 5 ビ イ		医甲貝切り丁ロ> 「牡子収別ヒン		, İ
	クー 地士			. 1
Tザボ川赤石田天所中 Vang S Dacaarab Fallow 「町空知母」 「町空知母」	Vong S Poo			
14IIg 5. Rt5taltil FC110W 197元独地(シアロ的双因とジス円97元ペンジ* 一般目	Tang 5. Res	coarch Fallow	研究組織と私郭機関との共同研究につい	
INANYANC TECHNOLOCICAL エレートアの一島朝の情報をおくって欲しい 一部 エート	INAIN	search Fellow	研究組織と外部機関との共同研究につい ての 最新の情報をおくって欲しい	一般情

	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	······································	
M. Shahinpoor	Regents Professor and Director	(封筒に入れた資料集を配り終わった後	一般情
(アクチュエータ関係の	THE UNIVERSITY OF NEW MEXICO	の遅い来訪のため)机上の説明資料を持	報
第一人者)	Artificial Muscles Research	「ち帰った。すべての資料一式を欲しかっ	
	Institute	72.0	
	Albuquerque, NM		1000
M. Salvia	ECOLE CENTRALE DE LYON	KIM多機能センサについての論义(或い	MFS
	Group Materiaux	は情報)を送って欲しい。	
	Cedex, FRANCE		01/1
K. Jung	WILLIAMS PYRO, INC.	KANTOC NITI コイルバネ 及び NITI極	SMA
	Fort Worth, TX	薄ファインフィルムの情報が欲しい。	
R. Thomson	Editor, Smart Materials	産学連携を主眼とするRIMCOFの展示は大	一般情
	Bulletin	変広範囲におよんでおり、当出版社の興	報
	ELSEVIER ADVANCED TECHNOLOGY	味がつきない。このプロジェクトの詳し	
	Oxford, UK	い情報と、参加組織の各々の役割につい	
		て知りたい。	
T. C. Hong	Systems Engineer	人工衛星の構造ヘルスモニタリングにつ	人工衛
	SCIENCE APPLICATIONS	いての情報が欲しい。	星のS
	INTERNATIONAL CORPORATION		HM
·	Houston, TX		
(質問のあるコメ	ベント)		
竹川直希	京都大学大学院工学研究科	こちらで開発されているFBGセンサーは	FBG
	土木工学専攻修士1年生	他社のものと比べてどのような特徴があ	
		るか?動的問題にセンサーを適用可能で	
		あるか? (会場にて東大助手岡部洋	
		二氏が回答)	
K. J. Durr	ドイツ	大阪市立大学教授、元木信弥氏の研究分	MFS
		野であるため、後日の回答を約束。	
C. B. Bright	BRIGHT ENGINEERING, INC.	magnetostrictive materialsの研究をし	MS
	Dynamic Electro-Mechanical	ているのか知りたい。	
	Systems		
	Ames, IA		
V. Lyori	Research Scientist	細径ポリイミドコーティングファイバー	FBG
	UNIVERSITY OF OULU	の値段を知りたい。	
	FINLAND		
M.N.G. Neihad	Associate Professor	FBGセンサに興味がある。耐熱温度等を	FBG
	UNIVERSITY OF HAWAII AT MANOA	知りたい。	
	Honolulu, HI		
P. Choquet	First Vice President	日立電線に質問: シングルモードでな	FBG
	ROCTEST LTD	くマルチモードの細径ファ イバーは製	DS
	Saint-Lambert. QC. CANADA	作できるか?	
		清水建設に質問: 開発したFBG変位計	
		の分解能と精度は?	
L (風味ある分野に~	ついてのコメント)		
I Q Huang	Associate Technical Fellow	細径FBGが優秀である。	FBG
v. w. nauno	BOEING		
	Phantom Works		
	Huntington Beach CA		
1	Internet the contraction of the	1	1

			Tura
K. K. Wetzel	Executive Vice President	Tertenol等のmagnetostrictive	MS
	AEROTECH	materialsの研究をしているので、この	
	Aerotech Engineering & Research	分野の研究に興味がある。	
	Corp		
 	Lawrence, KS		
P. Phule	NEW AGE MATERIALS INC.	このタイプのmagnetorheological fluids	MS
	Pittsburgh, PA	を提供できる。	L
K. P.	Lecturer	binary & ternary 形状記憶合金に興味	SMA
Mohanchandra	MANGALORE UNIVERSITY	がある。KANTOCのSMAに興味がある。	
	Materials Science Department		
	Mangalagangotri, INDIA		
M. Christiansen	所属不明	SHMに興味がある。複合材料におけるFBG	SHM,
	Odenton, MD	の使用は損傷や材料特性を決定する上で	FBG
		有効である。	
水谷義弘	青山学院大学	細径の圧電素子、形状記憶合金などはへ	SMA
	理工学部 機械創造工学科助手	ルスモニタリング以外にも適応できると	
		ころが多くあり、興味深い。デモンスト	
		レーターの結果を楽しみにしている。今	
		後も色々と教えて頂きたい。	
P. Masson	Assistant Prof.	複合材料パッチを用いた修理に興味があ	修理
	UNIVERSITE DE SHERBROOKE	る。(当方は EFPセンサーとPZTを使用	
	Mechanical Engineering	している。)	
	Department		
	Sherbrooke, Quebec, CANADA		
K. Schmidt	VOLKSWAGEN AG	自動車に応用できる、低価格の高性能	PZT,
	Environment and Transportation	PZT材料が欲しい。PZT, SMA, ERF/MRFに	SMA
	Materials	興味がある。	
r	Wolfsburg, GERMANY		
I. Maiguez B.	CICESE RESEARCH CENTER	光ファイバセンサを用いた分布型と半分	FBG
	Appl. Phys. Department	布型の構造モニタリングに興味がある。	
	San Diego, CA		
R. M. Lopez	CICESE RESEARCH CENTER	FBG grating を扱っているので、	FBG
Gutierrez	Appl. Phys. Department	hydrocarbon detection に使用できる素	
	San Diego, CA	材に興味がある。	
A. L. Gama	Prof.	知的材料で構造のモニタリングを研究し	FBG.
	UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE	ているので、FBG, SMA, PZTに興味があ	SMA, PZT
	Riode Janeiro, BRASIL	る。	
R. Ohavon	Prof. Chair of Mechanics	興味がある分野は、AEを用いたヘルスモ	AE
(仏の当分野の	CONSERVATOIRE NATIONAL DESARIS	ニタリングと室内騒音の能動的制御であ	SHM
重鎮)	ET METIERS	る。	
	Structural Mechanics and		
	Coupled Systems Laboratory		
	Paris, FRANCE		
H. B. Strock	Director of Technology	PNNZTのactive fiber compositeに興味が	PZT
2. 50000	CERA NOVA CORPORATION	ある。	
	Franklin, MA		
I Newhook	Assistant Prof	鉄筋コンクリートのスマート材に風味が	十木建一
	UNIVERSITY OF CALGARY	ある。	築
	Department of Civil Engineering		
1	Terar anous of errit miGincering	1	1

K. P. Chong	Director, Mechanics & Materials	大変よい展示である。	十木建
(米NSFの大家)	NATIONAL SCIENCE FOUNDATION		筑DS
	Arlington VA		* , D5
M I Wang	Prof Director of Bridge		+- 木-3中
(米十大建筑の	research Center UNIVERSITY	1-1-1-0	
(不工不建来》)	OF THINOIS AT CUICACO		(衆, 1)3
作性度以	Chipage H		
	United of the second se		10 mm 4
A. Pusekar	UNIVERSITY OF MARYLAND	硬化と製造上程に興味がある。	成形
	College Park, MD		(MFS)
[G. N.	Senior Engineer	大変興味深い技術なので、近い将来高品	全体的
Manuelpillai	UNIVERSITY OF TORONTO	質の工業製品として実用化されるだろ	に
(加の光ファイバセンサ	Fibre Optic Systems Research	う。	
応用の研究者)	Laboratory Institute for		
	Aerospace Studies		
	Toronto, ONT, CANADA		
C. J. Young	SSS LAB., Mechanical	大変興味深い製品である。	全体的
	Engineering		に
	Inchon, KOREA		
D Digna	District Sales Manager		全休的
2. 210.00	ENDEVCO		17
	Diamond Bar CA		
D Quenon	Principal Engineer	トアも情報号が多い展示である 一些け取	全体的
		ここの前報重が多い展示とのる。支け取ったパンフレットをじっくり詰むつたり	土144日ソ 1マ
	Aarospaco Electronic Systems	フルハンフレットをしつくり配むしもり	۲
D. N. Kornhluh	Senier recearch Engineer	しのる。	<u>A H-65</u>
K. D. KOIHDIUH	SCHIOL LESEALCH ENGINEEL	人変情報が多く、仅立つ肢小でのる。	王44町
	SKI INTERNATIONAL		K I
	Advanced Automation Technology		
77 77 1 1	Center Menio Park, CA		
v. verijenko	PTOI.	研究成果かよくあらわれている。 	全体的
	UNIVERSITY OF NATAL		に
	Solid Mechanics		
	Durban, REPUBLIC OF SOUTH		
	AFRICA		
J. Kim	Prof.	卓越したデモンストレーションである。	全体的
	INHA UNIVERSITY		に
	Dept. of Mech. Eng.		
	Inchon, KOREA		
L. D. Thompson	Associate Prof.	今後の研究のご健闘を祈る。	全体的
	SAN DIEGO STATE UNIVERSITY		に
	Dept. of Mechanical Engineering		
	San Diego, CA		
I. Chopra	Prof.	日本のsmart structure programの優れた	全体的
(米刈-ランド大学	UNIVERSITY OF MARYLAND	展示である。	
の回転翼研究の	Aerospace Engineering		
大家)	College Park MD		
I_R IIN	CTANEODD INIVEDCITV	立派な展示である	合体的
אחדת נ	Aaro Astro Dopt	上小な広へてのる。	土14印
	Attu/Astiu Depi.		*
	STRUCTURE COMPOSITE LAD.		
	UA		1

			T
F. Gordaninejac	Prof.	展示セットアッフのセンスが良い。	全体的
	UNIVERSITY OF NEVADA		に
	Composite and Intelligent		
	Materials Lab.		
	Reno, Nevada		
D. E. Geller	Sales Engineer	丁寧な説明をしてくれてありがとう。細	全体的
	MICRON OPTICS. INC	径FBGセンサの特徴がわかった。	に、FBG
	Atlanta, GA		
W. A. Maryniak	Senior Application Engineer	パンフレットの封筒にキャンディをつけ	全体的
	TREK INC.	た心遣いが光った。	に
	Medina, NY		
R. Walder	Sales Manager	出展者としてどのような展示をしている	全体的
(土木建築へ応	SMARTEC	のか知りたかった。	に
用学者)	Grancia, SWITZERLAND		
R. Kenny	Technical Manager	出展者としてどの分野の展示をしている	全体的
	SMART FIBRES LTD	のか知りたかった。	に、FBG
	Southampton, UK		
A. Daugela	Senior Staff Scientist	展示に興味があった。	全体的
	HYSITRON, INC		に
	Minneapolis, MN		
G. Akhras	Prof.	すばらしいパワーポイントによる説明	全体的
	ROYAL MILITARY COLLEGE OF	で、最新で適切なパンフレットである。	に
	CANADA	日本のもてなしの心に感謝。	
	Kingston, ONT, CANADA		
(アドバイス等)		
C. Boller	Chief Engineer Aircraft	今後、他のプロジェクトの成果との比較	全体的
(本プロジェクト参加	bu Structures	をするとよい。基本情報(論文、デー	に
者、欧州のまと	EADS	タ、動画ビデオ等)のウエッブサイトを	
め役のひとり)	Munich, GERMANY	開くとよい。このプロジェクトで達成さ	
		れた研究成果から、産業界が得られる恩	
ļ		恵を強調するとよい。	
		学会や研究機関に、産業界からのフィー	
		ドバックをせよ。	
西村 功	武蔵工業大学 建築学科	動くものを展示するともっと人々の注目	全体的
		を引くことができる。RIMCOFの名前をブ	に
		ースに大きく表示必要。	
C. Miyasaka	PENN STATE UNIVERSITY	かつて武田研究室に所属していたので、	全体的
	University Park,PA	一門の方達に数年ぶりにこの場で会え旧	に
		交を温めた。今後の活躍をお祈りしま	
		す。	

【キーワード】

FBG: Fiber Bragg Grating

SHM: Structural Health Monitoring

- MFS: Manufacturing Sensor
- SMA: Shape Memory Alloy DS: Displacement Sensor
- MS: Magnetostrictive Materials DS: PZT: Piezoelectric Materials AE:
 - AE: Acoustic Emission

(本コメント取りまとめは平野(東大)による)

第Ⅲ章

1 . .

共通基盤技術の形成

Ⅶ. 共通基盤技術の形成

共通基礎技術の形成に資する技術として下記を取得した。

- (2) 新たな特性データ取得・整備

 - ・ 振動・騒音制御技術開発のための基礎データの取得

-----第Ⅲ章 1.1.3節全体

- ・ 感温型及び磁性合金のアクチュエータ特性データの取得
 ------第IV章 1.1.3節全体、1.1.4節全体および
 1.1.5節 1.1.5.2項
- ③ 試験・評価手法、ツールの提供
 - - 1.1.4節全体
 - ・ RTM成形プロセス制御技術の確立
 - -----第Ⅱ章 1.1.3節 (2) (i)項および
 - 1.1.4節(2)(i)項
 - 分布アクチュエータの駆動制御技術の確立
 ---------------------第Ⅲ章 1.1.5節全体

国立研究所

I. スマート構造物の振動制御に関する研究

Ⅱ. スマートマニュファクチャリング技術の評価

-機械技術研究所-

-物質工学工業技術研究所-

工業技術院 機械技術研究所

スマート構造物の振動制御に関する研究

(参画研究者名) 小鍜冶 繁、菊島 渍。西鄉 宗玄

平成12年度研究内容

を行う。 レムズ ト構造物の振動制御技術の開発を目的と \subset て、平成1 \sim 年度では以下に示す研究

- (1)引続き、高次の振動モード用分布定数系スマートモードセンサ形状の設計を行う に、振動モードをグルーピングするクラスタ制御系の導入も図り、観測スピルオ 問題を惹起しない簡素なスマートセンサの開発を行う。 (۲ آ - / -
- (2)高次用分散型モードアクチュエータを開発すると共に、当該アクチュエータが必要にする最適加振位置、加振ゲインを決定する。さらに、モデル装置に分散型アクチュニ を行う。 タを貼付し、制御スピルオーバ問題を惹起しない独立した振動モ ド励起法の開究
- 3 最低次モードを対象としたスマー 用いたリアルタイムスマートモー ド制御系の開発を行う。 トモードセンサ/スマー ト分散型アクチュエ 文字

平成12年度達成状況

中パン マス移動による3次関数と付加マスを有するはりの和として考えられる。 塔状構造物が強制加振され振動すると、 ·え、図1に示すような形状で変位する。 各階のマスが構造物を支えるはりに変位拘束を 図に示すような振動モードの変位は、上下階の

計を行い、 本年度のスマートモ FEM解析を基にした設計法を明らかにした。 ドセンサ開発では、図に示す変位拘束を考慮したモ ドセンサ票

ц Г Ч К して、 変化している。この鋸歯状センサを塔状構造物に貼付し、床に振動を与える れまでに報告したなめらかな曲線のセンサ形状から図に示すような鋸歯状のセ 対象とした振動モ ド分離に難点があるが、高周波数の分離性能を [最低時の振動モードを分離・独立させたモードセンサ形状を示すと図2 ドセンサ出力特性を示すと図3となる。形状カッティング時の誤差等で ードは、 最低次の振動モ ードから3次の振動モ ドまで行った。 11 でな 2次の振動 とで得られ ンサ形状に 300 —例 二

大幅に向上させる(20Hz で 10dB 以上)ことができ、観測スピルオーバを低減化できることが確認できた。

熬するこ 発では、 現化を図った。 するエー する慣性型アクチュエータ、塔状構造物下部に設置 同極同士を対抗さ て新型の動電型加振器を開発 クチュエーション法を提案すると共に、当該法の具 アクチュエー 変位発生量が少ない積層型圧電素子に変え とで振動モードをグループ化する分散型ア メントアクチュエータのゲイン・位相を調 また、モーメントアクチュエータ開 ・夕開発では、塔状構造物上部に設置 せて磁場を集中させる方式は従来 (図4) した。 磁石の





する 位を発生でき の動電型加振器と (積層型圧電素子 パク 11 ト化す とができ N eN 比較する \cap \times な \cap ができる。 比較す いび 4にも示し ると発生変位は少なく すると 100 倍以上の変 発生する力を増大さ も示したように小型コ

定数系 最後の \$ n# Σ つながる。 7 Ś レイ た れば簡素 と共に d' 11 7. バッ 1 1 $\overline{}$ [1 П ク制御系の構築を 1 サ及び、 開発では ム全体のコストダウンに ņ ドバック制御系が実現で ラが不要) よう)।। ज Ц Ť な制御系に Н J 4 ダ イレク Ŕ を用 分布 đ۴

寅 Y ずれている なわち、 Ĵ, の具現化は [1] とができ 構造物に 構造物に平行な力を発生できるモ ŝ J. ビン かめ 分布定数系モ なな て簡単な手法で実現させ 力の位相関係が90 タ を用いれば良い。 ドセンサの出





図3 1次の振動モード振幅





図5 モードセンサ出力特性(非制御)

図6 モードセンサ出力特性(制御)

- 346 —

メントアクチュエータを用いることでコントローラを使用しないダイレクトフィードバック系が構築できる。図5(非制御)及び図6(制御)に高さ2.1mのショートモデル実験装置によるダイレクトフィードバック制御系による実験結果を示す。両図を比較すると明らかなように、目的とした1次の振動モード増幅部で-13dBの抑制が行うことができており、きわめて簡素なモード制御系構築が行えた。

また、分散型モードアクチュエーション法と高次の振動モードまで対象とした振動制御 実験も簡素なPI制御系を用いて構築した。塔状構造物モデルは、高さ3mの実験装置を 用い、1次と2次のモードセンサ出力を PI 制御器に入力し、1次と2次の振動モード出 力の和をモーメントアクチュエータに比例入力すると共に、時間微分したセンサ出力の和 を慣性型アクチュエータへフィードバックする簡素なシステム構成とした。また、制御ゲ インは実験的に求めた最適値としている。

制御を講じることで1次のモード振幅は図7となる。29.5dB あったピークは 17.5dB まで抑制されている。ここで、-12dB の抑制で実験を中止した理由を簡単に述べさせていただくと、最上階に設置した慣性型アクチュエータの制御力は、マス重量×加速度であり、低周波数になると加速度が極端に低下して必要な制御量が得られなくなる。本実験においてもマスが有効ストロークを超過した状態となったため1次のモード抑制を-12dB の抑制で中止した。







図8 2次振動モード振幅抑制結果





つぎに、2次の振動モード振幅を図8に示 す。2次の振動モードは、上下のアクチュエ ータ共に十分な制御力を発生しており-20dB 以上の抑制となっている。2つの振動モード 抑制を行った場合の最上階加速度のスペクト ルをみると図9となる。1次、2次のピーク が簡素な制御系で抑制されていることが確認 できる。また、このときの時刻歴応答を示す と図10となり、図上の最上階変位、図中の 1次の振動モード振幅、図下の2次の振動モ ード振幅いずれをみても十分な抑制が得られ た。

当該年度の発表リスト

<論文発表>2件

(1) 分布定数系平板構造物を対象とするスマ ートセンサ・クラスタフィードバック制御 系の安定性について,田中信雄,菊島義弘, 日本機械学会論文集C編, vol.66 ·646, pp.1793 –1799



- 図10 各センサ出力及び最上階変位 の時刻歴応答
- (2) Active Vibration control of a Truss Structure using modal sensor (Development of a distributed modal sensor), 菊島義弘,田中信雄, The Fifth International Conference on Motion and Vibration Control, vol.1, pp.273-278
- <口頭発表>7件
- (1) 塔状構造物の振動制御に関する研究 (ハイブリッドアクチュエータによるモード制御),菊島義弘,西郷宗玄,瀬川武彦,田中信雄,機械技術研究所研究発表会,2000.6
- (2) The Model Analysis of Viaduct Road Part with FEM, イスマイル・ユックセック, 菊島義弘, 西郷宗玄,田中信雄, 機械技術研究所研究発表会, 2000.6
- (3) 塔状構造物のモード制御に関する研究(グループ化アクチュエータによる振動モード 制御),菊島義弘,セリム・シブリオグル,西郷宗玄,田中信雄,第10回環境工学総合シン ポジウム 2000, 2000.7.
- (4) 高架橋道路のクラスター制御(モデル装置を用いたクラスター化の実験的検証), 菊島 義弘,イスマイル・ユックセック,セリム シブリオグル,田中信雄, 2000 年度年次大会 2000.8.
- (5) Cluster Control of a Viaduct Road,イスマイル・ユックセック, 菊島義弘,セリム シブリオ グル,田中信雄, 2000 年度年次大会, 2000.8
- (6) 高架橋道路カーブ部のクラスター制御 (実験的検証), 菊島義弘,イスマイル・ユック セック,田中信雄, Dynamics and Design Conference 2000, 2000.9
- (7) Cluster Control for a Curve Viaduct Road,イスマイル・ユックセック, 菊島義弘,田中信雄, Dynamics and Design Conference 2000, 2000.9.

国立研究所

I.物質工学工業技術研究所
 研究中項目名 スマートマニュファクチャリング技術の評価
 研究小項日名 成型プロセスモニタリング技術の評価
 研究期間 平成 10 年度~平成 14 年度

参画研究者所属 物質工学工業技術研究所 複合材料部 参画研究者 剱持潔、高橋淳、卜部啓、津田浩

1. はじめに

大型化、複雑化が進む複合材料・構造体の信頼性及び安定性を向上させるとともに、製 造工程を効率化して、軽量化、長寿命化、低コスト化を実現するためには、成形工程で樹 脂の硬化・含浸状況を検出してそれに基づいて成形装置の制御を行うスマートマニュファ クチャリング技術が重要である。特に、大型の構造物の成形やRTM(Resin Transfer Molding)成形のスマート化においては、硬化進展の不均一や不連続性、あるいは樹脂の 流動状況の検知が重要となる。本研究は、電気物性を使う成形モニタリングにおいて、1 MHz以下の低周波信号を用いる従来法とは異なり、波長が材料・構造体の寸法と同程度 となる高周波信号(数百MHz以上)を用い、材料・構造体中に形成した電磁波伝送線路の特 性変化を利用することにより、硬化状況のみならずその分布や不連続性を検出・評価する ことを目的としている。前年度までに、電磁波伝送線路からの反射の周波数特性が樹脂硬 化モニタに応用可能で、物性分布や不連続点の検出可能性があることを明らかにした。ま た、時間領域での反射応答特性から、硬化・含浸状況の不連続点の位置や分布に関するよ り明確な情報を得られることを明らかにした。平成12年度は、伝送線路構成のための導 体の貼り付けあるいは埋め込みによる成形工程増や材料特性の劣化を避ける目的で、先進 複合材料の構成要素である炭素繊維を、その導電性を活用して線路要素として利用するこ とについて検討を加えた。

また、光ファイバセンサは、成形中の応力・ひずみの検知とともに、成形後の構造体の 健全性モニタにも利用できるものとして有力である。これを構造体と一体化して知的構造 体のセンサとして使用する上では、ファイバ表面の被覆が重要な意味を持つ。前年度には、 光ファイバのセンサとしての信頼性評価とともに、一体化した際の強度部材としての可能 性についても検討するために、光ファイバの表面被覆と破断荷重の関係、及び再コーティ ングの影響について評価し、ファイバの強度が周囲の被覆によって維持されていること、 被覆を除去したものへの再コーティングにより強度が回復することを明らかにした。平成 12年度は引き続き、光ファイバの表面改質がファイバと樹脂との界面のすべりに与える 影響について評価を行った。

2. 研究内容及び成果

(a) 炭素繊維の電磁波伝送特性による樹脂含浸・硬化状態検出

平成12年度の実験では、伝送線路のグランド導体としてPAN系炭素繊維平織クロス(東 レトレカ*6151B;使用糸及び密度は縦横ともT300B-1000×17.5本/25mm)を、また線路 導体としては同じクロスから引き抜いた繊維束(フィラメント数1000本)を1~3本使用し て、マイクロストリップラインを構成した。また、比較のために線路導体として直径 0.1mmの銅線を用いた実験も行った。図I-1に実験装置の概略を示す。アクリル製の 枠にクロス(幅8cm、長さ約35cm)を敷き、クロスの一端を高周波用レセプタクルのフラン ジに、また繊維束の一端を同じレセプタクルの中心導体に、それぞれ導電性エポキシで固 定(銅線の場合はんだ付)して入力端とし、導体間隔2.5mmの伝送線路を形成した。そして これを時間領域反射特性測定機能(TDR)付高速ディジタイジングオシロスコープ(Agilent Technologies 54750+54754)に接続した。終端側は、これまでの実験では50Ωの負荷とし ていたが、今年度は終端のコネクタを不要として系を簡素にするために、導体(繊維束又 は銅線)を導電性粘着テープでクロスに接続することにより短絡端とした。樹脂としては 前年度と同様ビスフェノールA型エポキシ樹脂にジエチレントリアミンを当量混合したも のを使用し、室温で緩やかに硬化させた。オシロスコープでは、立ち上がり78ps、高さ 200mVのステップ電圧を供給して、基準点での電圧の時間変化(電圧応答)を検出し、その データを樹脂温度とともに記録した。この、基準点での電圧には、線路途中に不連続点が あるとそこからの反射波が加わるので、電圧応答は不連続点までの伝搬時間、不連続点前 後での線路特性、及び線路の損失の影響を受け、線路間の物質(樹脂)の物性分布を反映し たものとなる。

図I-2に終端側から未硬化の樹脂を注入した時の応答を、線路導体として炭素繊維束 1本、3本、あるいは径0.1mm銅線を使用した場合について示す。樹脂がない場合、応答 の立ち上がりが入力端での反射に、その後最初の下降は終端での反射に、以後の下降は線 路内での多重反射に、各々対応する。樹脂を注入すると、これに樹脂端での反射及び線路 特性の変化の影響が加わる。図2において、線路導体が銅線の場合((c))では信号レベ



-350-



ルがやや異なる他は前年度の金属導体の 場合と同様の応答を示したが、繊維束の 場合には応答特性が右上がりとなった。 この傾向は繊維束1本の場合((a))の方 が3本の場合((b))に比べて顕著であり、 炭素繊維束の低導電性による線路の直列 損失の影響を受けたものと考えられる。 しかし、樹脂層及び空気層の長さや境界 の位置を検知することは、金属導体の場 合と同様に可能である。また、グランド 導体としての炭素繊維クロスの利用につ いては、金属板と比較して応答に特段の 差が見られなかった。なお、樹脂硬化状 態の検知に関しては、図I-3に示すよ うに、前年度の金属導体使用の場合と同 様、硬化進展とともに応答レベルが誘電 率及び誘電損失の上昇を反映して全体に



図I-3 電圧応答レベル(3ns)の、硬化進展に伴う変化。(グランド導体:炭素繊維クロス、線路導体:炭素繊維クロス、線路長27cm、線路全体に樹脂を充填。)

(。 点間中 器 縣 뇌 界 訣 , mol 8



大凾の答応?な亦存の層浸空?なるいてったると範囲不ややいめたの共駐電綉の間樹おい合愚の 。を示き答応の合愚るな異りよい所愚?な剳毀扑動おいこと一日図。たきで出検てしく(阳夭)酷 炭、ののもいさ小やや?な外変号計とる>とれ合愚の特尊線園金の寛辛萌もていないれずい 立のそ、?な誘重不の態氷扑動や層浸空の中途、きい合愚たし用力てしる素要路を難繈素 罰のそ、?な誘重不の態氷扑動や層浸空の中途、きい合愚たし用動でしる素要路を推翻置

副結響湯るもれゴリシもの面界部樹へバトママ、の賀坊面表のバトマC光(d)

(。专示支容讯

のさな闇景空站印头。mo8 以点

村の虋姊のイーマ(マヤママママのmu055 至50,0mの音話)同子贾辛前, アノメ林魏璘 けけき夢城の及, んきちし去約を露班のこ, (mu551 至声の浩スそでけ)パトマで光さい またです本1をされこ, い用き(mu52 至20,0mの美社の大きで手下)の中に埋め込んだ。そして、そこから働高術を加いた。 意志のわれ前のmm655号人の「新商5×10mm, 長さもあために中に用いし、 けを切り出し、マトリッケスケッッケを発生させるために中央前面御画御画御画で 引張速度 5mm/mm6引張振興(鄭城北日で3)、人工による本の露軸, 単述のる

(ヤントモービ)層内3(ヤンビーモモ)層枠の劈捗はついトキで光るあの劈坊、果諾の多 てと異進糖>お前周界、さか線曲間却一重荷、ひご話やき抜店フリ坐発や糖>お面界で間の す大量ため末さか重荷大量。たっか分れらごるいフリ宝交でから影や尻氷け抜店のパトキ 間のパトキでも間様、おご合根のパトキでたし去約を劈坊。たっあでBPMO.I お詰抜けか ご誘重不やけ抜臣パトキでの及異進糖>お面界、さか線曲間却一重荷、し主発やき抜店で し存存な糖>はのがトキでもした約を劈坊。たっあでBPMO.I お詰抜けか ご読重不やけ抜臣パトキでの及異進糖>お面界、たいないます。 されたいたいたいと、う悪な掛れぬの面界、おれこ。たれき気能なとこといてり生 進齢>お前界だし宝安、さみ線曲間却一重荷、り主な糖>な面界で間のパトキでも耐内の 近端とれ面界でしていたいをからGTお詰抜けかを大量。ちれらえ考らぬたた ご論大きりま者に前お洗けのを大量。たっかみながらころいてきばなけ抜臣パトキでも 支強高、した前な豊厳荒鉄の層状内の野菇りまごあいてきばなけ抜臣パトキでも 支強高、した前が豊厳荒鉄の層状内の野菇りまいもあったらかもGMO.A、う高 まなの前の第回、よこ合根さん気の単本の5よいるあ本01つ層間mm6.0 全パトキで、なる られた。

3. まとめ

時間領域での電磁波伝送特性による樹脂含浸・硬化状態検出における、炭素繊維の線路 要素としての利用について実験的に検討した。その結果、マイクロストリップラインの導 体として炭素繊維束を使用した場合、金属導体と比べ応答特性に低導電性の影響が現れる が、樹脂の含浸・硬化状態の検出が可能であること、また炭素繊維クロスはグランドとし て金属とほぼ同様に使用できることが分かった。また、光ファイバの表面改質がファイバ と樹脂との界面のすべりに与える影響について評価を行った。その結果、光ファイバを焼 成処理することにより界面のすべり抵抗が向上するとともに、界面はく離の進展が安定す ることが分かった。

研究発表

<u>論文</u>

(1) 津田浩, 武田真一, 卜部啓, 高橋淳, 岸輝雄, "Michelson光干渉型光ファイバセンサを用いたCFRPの衝撃損傷検出", 日本複合材料学会誌, 26,4 (2000) 121-129

(2) K. Urabe, J. Takahashi, H. Tsuda, K. Kemmochi, "Cure monitoring of matrix resin with high-frequency electromagnetic wave transmission line", Journal of Reinforced Plastics and Composites, 19, 15 (2000) 1235-1250.

(3) K. Urabe, H. Tsuda, J. Takahashi, K. Kemmochi, "Monitoring of Resin Flow and Cure by Time Domain Response from an Electromagnetic Wave Transmission Line", Materials Science Research International, Special Technical Publication-Vol.II (*in press*).

<u>口頭 その他</u>

- (1) ト部啓,高橋淳,津田浩,剱持潔,"電磁波伝送線路を利用した樹脂含浸・硬化状態 検出",第7回新素材及びその製品の非破壊評価シンポジウム (2000.6,名古屋)
- (2) 卜部啓, "高周波電磁波による成形プロセスモニタリング",物質研ニュース 第45号 (2000.7)
- (3) 卜部啓, 高橋淳, 津田浩, 剱持潔, "炭素繊維の電磁波伝送特性による樹脂含浸・硬化状態検出", 第25回複合材料シンポジウム (2000.10, 札幌)
- (4) 卜部啓,高橋淳,津田浩,剱持潔,"電磁波伝送特性による樹脂含浸・硬化状態検出", 日本非破壊検査協会平成12年度第2回電場計測応用研究会(2000.11,仙台)
- (5) 卜部啓, 高橋淳, 津田浩, 剱持潔, "電磁波伝送線路の時間領域応答特性による樹脂 含浸・硬化状態検出", 第2回「知的材料・構造システム」シンポジウム (2000.12, 東 京)

本報告書の内容を公表する際はあらかじめ、 新エネルギー・産業技術総合開発機構 応用技術 開発室の許可をうけて下さい。 電話 03·3987-9498(直通)